

AALTO-YLIOPISTO

Insinööritieteiden korkeakoulu

Energiatekniikan laitos

Jenni Kiukkonen-Kivioja

**Pientalon lämmityksen ohjaus usean energialähteen
yhdistelmällä – järjestelmän toteutus ja demonstrointi
simulointiympäristössä**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Järvenpäässä 9.11.2015

Työn valvoja: Professori Jouko Pakanen

Työn ohjaaja: Professori Jouko Pakanen

AALTO-YLIOPISTO INSINÖÖRITIEIDEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 AALTO http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Jenni Kiukkonen-Kivioja			
Työn nimi: Pientalon lämmityksen ohjaus usean energialähteen yhdistelmällä – järjestelmän toteutus ja demonstrointi simulointiympäristössä			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Energiatekniikan laitos			
Professori: Talotekniikka		Koodi: Rak-130	
Työn valvoja: Professori Jouko Pakanen Työn ohjaaja: Professori Jouko Pakanen			
<p> Euroopan unioni on asettanut tavoitteekseen, että kaikki jäsenmaat vähentävät kasvihuonepäästöjään 20 prosenttia vuoteen 2020 mennessä. Rakennukset tuottavat kolmasosan maapallolla syntyvistä kasvihuonepäästöistä. Tämä johtuu rakennuksen lämmittämiseen käytetyistä energiamuodoista. Rakennusmääräykset rakennusten energiankulutuksesta tiukentuiivat vuonna 2012 ja suosivat uusiutuvan energian käyttöä. Nykyisin samassa rakennuksessa voidaan käyttää useita uusiutuvan energian muotoja yhtä aikaa. Kuitenkin niiden yhteiskäyttö ja koordinoitu ohjaus on käytännössä vielä vähäistä. </p> <p> Diplomityön tavoitteena on tutkia pientalon lämmitysjärjestelmän toimintaa, joka rakentuu useasta energialähteestä. Työssä tutkittiin sähkön, maalämmön ja aurinkolämmön yhdistämistä lämmitysjärjestelmän energiantuottajana. Työ toteutetaan ja demonstroidaan simulointiympäristössä. Järjestelmää hyödyntämällä pyritään selvittämään, miten aikaansaadaan eri energiamuotoja yhdistävä energiatehokas, koordinoitu ohjaus. Mitä etuja tai haittoja eri energiamuotojen yhteisestä ohjauksesta syntyy? Tämän selvittämiseksi TRNSYS-simulointiympäristöön kehitettiin Fortran-ohjelmointikielellä uusi lämmityksen ohjauslogiikka, joka koordinoi eri energiamuotojen toimintaa. </p> <p> Yhdistettyä lämmitysjärjestelmää ja sen ohjausta demonstroitiin simulointiympäristössä. Havaittiin, että järjestelmän koordinoitu ohjaus pientalossa on energiatehokkaampi ratkaisu kuin ohjattaessa jokaista järjestelmää erikseen. Ongelmana on, että yhdistetty lämmitysjärjestelmä tuo kokonaisuuden suunnitteluun ja toteuttamiseen haasteita kytkentöjen, toimintalämpötilojen ja toiminta-aikojen sovittamisessa. Haasteellisuus tulee ilmi myös yhdistetyn järjestelmän ohjauksessa. Ohjauslogiikasta tulee helposti komplisoitu, koska logiikka ohjaa prosessin kaikkia laitteita ympäristön olosuhteiden mukaisesti, mutta pyrkii samanaikaisesti energia- ja kustannustehokkaaseen lopputulokseen. </p>			
Päivämäärä: 9.11.2015		Kieli: suomi	
		Sivumäärä: 67 + 16	
Avainsanat: TRNSYS, simulointi, uusiutuva energia, aurinkolämpö, maalämpö, ohjauslogiikka			

AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF ENGINEERING PO Box 11000, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Jenni Kiukkonen-Kivioja			
Title: Single-family home heating control by a combination of several energy sources - the implementation and demonstration of system in a simulation environment			
School: School of Engineering			
Department: Department of Energy Technology			
Professorship: Building services		Code: Rak-130	
Supervisor: Professor Jouko Pakanen Instructor: Professor Jouko Pakanen			
<p>The European Union has set a target that all member states reduce their greenhouse emissions 20 per cent by the year 2020. Buildings produce one third of the global greenhouse emissions. This is due to energy forms used in heating. Finnish building regulations on energy efficiency has been tightened in 2012 and the new regulations favor renewable energy. Today in buildings many different sources of renewable energy can be used simultaneously. Use of combined operation and coordinated control is still a minor solution.</p> <p>The aim of this thesis is to examine the functioning of a small house heating system in the northern climate, which is based on a number of energy sources. The heating system is combining electricity, geothermal and solar thermal as heating energy producer. The work is carried out and demonstrated in a simulation environment in TRNSYS. How to build up a control system that is energy-efficient coordinated and consist of various forms of energy. To achieve this, the control logic was created in TRNSYS with Fortran-programming language.</p> <p>The combined heating system and control was demonstrated in a simulation environment. It was detected that systems with coordinated control in small houses were more energy efficient than each system controlled separately. However more challenges rise with the need to combine connections, operation temperatures and operation times to design and to implementation complex system. Controlling of the combined systems also becomes more challenging. Control logic becomes easily complex, because logic adjusts all devices in relation of environmental conditions, but also at the same time aims for energy- and cost efficient results.</p>			
Date: 9.11.2015		Language: Finnish	
		Number of pages: 67 +16	
Keywords: TRNSYS, simulation, renewable energy, solar heat, geothermal heat, control logic			

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin Aalto-yliopistossa Insinööritieteiden korkeakoululle osana RYM Sisäympäristö–tutkimusohjelmaa. Haluan kiittää työni ohjaajaa professori Jouko Pakasta saamastani eteenpäin potkimisesta ja avusta, erityisesti ohjelmointiin liittyvissä ongelmissa.

Erityinen kiitos kuuluu perheelleni kaikesta tuesta, jonka olen saanut kuluneiden vuosien aikana.

Järvenpäässä 9.11.2015

Jenni Kiukkonen-Kivioja

Sisällysluettelo

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO	8
1.1 TUTKIMUKSEN TAUSTA.....	8
1.2 TUTKIMUKSEN TAVOITE.....	9
1.3 TUTKIMUKSEN RAKENNE JA RAJAUS	10
2 KIRJALLISUUSTUTKIMUS	11
3 SIMULOINTIYMPÄRISTÖN KUVAUS.....	15
3.1 HYBRIDIVARAAJA	15
3.1.1 Yleistä	15
3.1.2 Rakenne	17
3.2 KÄYTTÖTILANTEET	18
3.3 RAKENNUKSEN TIEDOT.....	21
3.4 LÄHTÖKOHTA.....	22
3.5 YHDISTETYN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KUVAUS.....	23
4 TYPE 264-OHJELMAN KUVAUS	28
4.1 YLEISTÄ	28
4.2 TYPE 264-OHJAUSOHJELMAN KUVAUS.....	31
5 YHDISTETYN JÄRJESTELMÄN TOIMINNAN TESTAUS JA DEMONSTROINTI	33
5.1 AURINKOPIIRIN KIERTO MAALÄMMÖN KERUUPIIRIIN	33
5.2 YHDISTETYN JÄRJESTELMÄ ILMAN KERÄYSPIIRIEN VENTTIILEITÄ	44
5.3 YHDISTETTYJEN JÄRJESTELMIEN VERTAILU AIEMPIIN SIMULOINTIMALLEIHIN	53
5.4 JÄRJESTELMIEN SPF-LUKU.....	55
6 YHDISTETYN JÄRJESTELMÄN HYÖDYT JA HAITAT	58
7 POHDINTA JA KEHITYSEHDOTUKSET	62
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	64
LIITE A. TYPE264 FORTRAN-KOODI VENTTIILI-JÄRJESTELMÄLLE	68
LIITE B. TYPE264 FORTRAN-KOODI ILMAN VENTTIILEITÄ-JÄRJESTELMÄLLE.....	74
LIITE C. RAKENNUSMALLI	80
LIITE D. HYBRIDVARAAJAN TIEDOT	81
LIITE F. AURINKO-MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄ	82
LIITE G. AURINKOPIIRIN KIERTO MAALÄMMÖN KERUUPIIRIN VENTTIILEIDEN KAUTTA.....	83

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Käytetyt symbolit

γ	ohjaussignaali
ϕ	teho
ρ	tiheys
A	pinta-ala
c_p	ominaislämpökapasiteetti
d	paksuus, halkaisija, etäisyys
H	ominaislämpöhäviö
L	pituus, syvyys
N	Lattialämmityksen putkipiirien lukumäärä
n	virtauskerroin
n_{50}	rakennuksen vaipan ilmatiiveys
q	virtaama
T	lämpötila
U	lämmönläpäisykerroin
V	tilavuus

Käytetyt lyhenteet

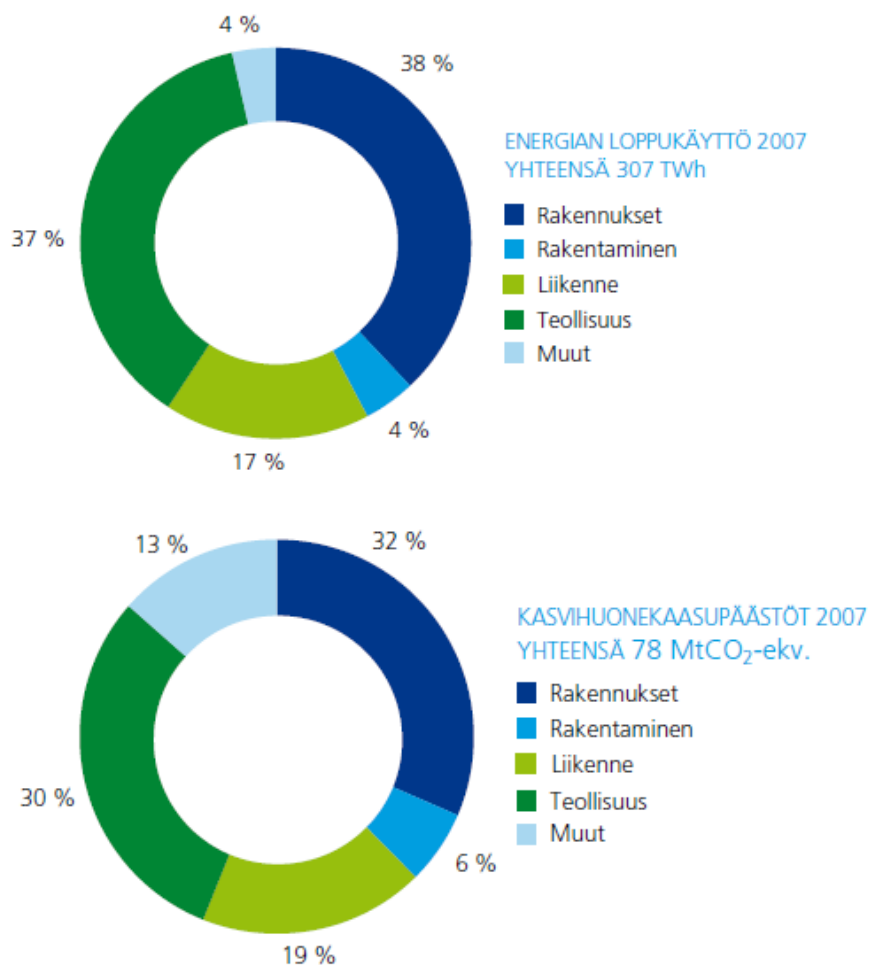
COP	Coefficient Of Performance
CVF66	Compaq Visual Fortran 6.6
IVF	Intel Visual Fortran
MS	Microsoft
TMF	TRNSYS Model File
TMY	Typical Meteorological Year
TRNSYS	TRaNsientSYstemSimulationtool
GSHP	Ground-source heat pump
SAGCH	Solar-assisted ground-coupled heat pump
SAGSHP	Solar-assisted ground source heat pump
MPC	Multi-variable model predictive control
SPF	Kausittainen suorituskykykerroin

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Uusiutuvan energian käyttö on lisääntymässä kaikkialla maailmassa. Fossiilisten polttoaineiden loppumisen pelko, päästörajoitukset ja sähkön hinnan nousu johtavat haluun kehittää lisää uusiutuvien energiamuotojen käyttöä.

Euroopan unionin tavoitteena on pienentää kasvihuonepäästöjä 20 %, nostaa uusiutuvien energiamuodoilla tuotetun energian määrää 20 % ja vähentää primäärienergian kulu-
tuksesta 20 % vuoteen 2020 mennessä. Säästötalkoot on helppo aloittaa rakennusten osalta, koska niissä käytettävä ja rakentamiseen kuluvan energian osuus on 40 % energian loppukäytöstä vuonna 2007. Kasvihuonepäästöt kuluttavat siitä toiset lähes 40 % [1].



Kuva 1 Vuoden 2007 Suomen nykyinen loppuenergian käyttö ja kasvihuonepäästöt [1]

Suomessa auringon säteily on voimakkaampaa kuin yleisesti luullaan. Säteilytehokkuus on yhtä suurta kuin esimerkiksi Pohjois-Saksassa, jossa aurinkokeräinten käyttö on Suomea paljon yleisempää. Etelä-Suomessa auringon säteily vaakatasolla on vuosittain n. 1000 kWh/m² ja Keski-Suomessa n. 900 kWh/m². Auringosta saatavan lämmön tai energian määrään vaikuttaa säteilyn voimakkuus ja aurinkokeräimen tai aurinkopaneelin suuntaus. Laitteen suuntaukseen vaikuttaa kallistuskulma ja atsimuuttikulma. Kallistuskulma on vaakataason ja laitteen pinnan välinen kulma. Atsimuuttikulma tarkoittaa poikkeamaa etelästä [2].

Usean energialähteen lämmitysjärjestelmiä on normaalikäytössä Suomessa, mutta niiden käyttöä on dokumentoitu vain vähän. Maalämpöpumppujärjestelmä on tavallinen esimerkki usean energialähteen järjestelmästä, jossa maalämpöpumppu lämmittää lämminvesivaraajaa ja sähkövastukset toimivat varalämmönlähteenä. Aurinkokeräinjärjestelmä on samalla tavalla osa usean energian järjestelmää, koska aurinkokeräin ei yksin riitä lämmittämään lämminvesivaraajaa vaan tarvitsee sähkövastukset lisälämmönlähteeksi. Aurinko- ja maalämmön yhdistävää lämmitysjärjestelmää ei ole paljon käytössä. Järjestelmät voivat toimia yhdessä, mutta niitä säädetään yleensä erikseen. Markkinoilla on valmiita sovelluksia aurinko- ja maalämmön ohjauksen yhdistämiseen, mutta laitevalmistajien ohjauslogiikat eivät ole julkisia. Investointikustannukset ovat vielä suuret aurinkolämmön ja maalämmön yhdistävässä lämmitysjärjestelmässä, mikä vähentää asiakkaiden halukkuutta hankkia usean energialähteen käsittävää lämmitysjärjestelmää.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Diplomityön tavoitteena on demonstroida pientalon lämmitysjärjestelmän toimintaa, joka rakentuu useasta energialähteestä. Keskeisenä apuvälineenä käytetään rakennuksen ja eri energiamuotojen yhdistävää simulointimallia, joka on aikaansaatu TRNSYS-ohjelmistolla (TRaNsientSYstemSimulationtool). Tavoitteena on selvittää miten eri energiamuotoja voi käyttää energiatehokkaasti yhdessä rakennuksen ja sen käyttöveden lämmittämiseen. Mitä hyötyä eri energiamuotojen yhdistämisestä syntyy ja mitä ongelmia yhdistäminen tuo tullessaan. Mitä asioita pitää ottaa huomioon, kun suunnitellaan ja ohjataan yhdistettyä lämmitysjärjestelmää. Työssä on keskitytty sähkön, maalämmön ja aurinkolämmön yhdistämiseen lämminvesivaraajan lämmitysenergian tuottajana. Tätä demonstroitiin kehittämällä TRNSYS-ohjelmistoon Fortran-ohjelmointikielellä uusi

lämmityksen ohjauslogiikka, joka koordinoi eri energiamuotojen toimintaa ja säättää varaajan lämmittämistä ulkolämpötilan, energiakulutuksen ja sähkön hinnan mukaan.

1.3 Tutkimuksen rakenne ja rajaus

Työ jakautuu kirjallisuustutkimukseen sekä empiiriseen tutkimukseen simulointimallilla. Kirjallisuustutkimuksessa käydään läpi aiemmin tehtyjä tutkimuksia, joissa on tutkittu aurinko- ja maalämpöjärjestelmän yhteistoimintaa. Luvussa 3 esitellään simulointikohdetta, käytettyä aurinko- ja maalämpöjärjestelmää, hybridivaraajan rakennetta, toimintaa ja käyttötilanteita. Luvussa 4 esitellään työssä käytetyn säätöohjelman rakenne ja toiminta. Luvussa 5 esitellään simulointitulokset, jotka saatiin TRNSYS-ohjelmalla. Simuloinneissa käytettiin hyväksi aiemmin kehitettyä ohjelmistoalustoja [3] ja ohjelmakoodia [4], jotka muokattiin työhön sopivaksi. Luvussa 6 esitellään usean eri energiamuodon tuomia muutoksia ja luvussa 7 esitetään pohdintoja ja kehitysehdotuksia seuraaville simuloinneille samasta aiheesta.

2 KIRJALLISUUSTUTKIMUS

Aurinkokeräimen ja maalämpöpumppujärjestelmän yhteiskäyttö on ajankohtainen aihe ja sitä on paljon tutkittu.

Useimmat tutkimukset koskevat aurinkokeräimellä avustetun maalämpöpumpun toimintaa, energiatehokkuutta ja säätöä. Järjestelmien toimintaa tarkastellaan usein suunnittelun näkökulmasta. Työni eroaa tutkimuksista siinä, että aurinkokeräin ja maalämpöpumppu ovat erillisiä piirejä ja menevät omina piireinä lämminvesivaraajaan. Monissa tutkimuksissa aurinkopiiri on yhdistetty suoraan maalämpöpumppuun.

Farzim M. Radin, Alan S. Fungin ja Wey H. Leongin [5] tutkimuksen aiheena oli aurinkokeräimillä avustetun hybridi-maalämpöpumppujärjestelmän suorituskyky ja toteutuskelpoisuus lämmitysvaltaisessa rakennuksessa. Hybridi-maalämpöpumppu tarkoittaa systeemiä, joka sisältää maanalaisen ja maanpäällisen lämmönsiirtimen. Radin, Fungin ja Leongin tutkimuksen mukaan maalämmön keräyspiirissä olevien porakaivojen pituutta voidaan lyhentää 15 % lisäämällä aurinkokeräimet maalämpöjärjestelmän avuksi.

Enyu Wangin et al. [6] tutkimuksessa muodostettiin hybridijärjestelmä, joka koostui maalämpöpumppupiiristä sekä aurinkokeräimillä avustetusta maalämpöpumppupiiristä. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää hybridijärjestelmän käyttöä toimistorakennuksen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Siinä todettiin, että maalämpöjärjestelmässä on syytä kiinnittää huomiota maasta otettavan ja maahan lisättävän lämmön määrään. Näiden ero pitäisi pysyä tasapainossa. Muuten maanpinnan lämpötila voi laskea tai nousta pitkällä aikavälillä, mikä saattaa aiheuttaa häiriöitä maalämpöjärjestelmän toimintaan.

Tao Hun, Jialing Zhun ja Wei Zhangin [7] tutkimuksessa selvitettiin kahden eri järjestelmän lämmityksen toimintaa ja energian siirtokykyä. Toinen järjestelmä oli maalämpöpumpun ja aurinkokeräinten yhdistelmä ja toinen aurinkokeräin avusteinen maalämpöpumppujärjestelmä. Tutkimuksessa aurinkokeräin lämmitti käyttöveden ja maalämpöpumppu lämmitti lämmitysverkoston. Tutkimuksessa saatiin selville, että lämpökaivossa virtaavan nesteen lämpötila voi nousta kolmella asteella, kun käytetään hyväksi aurinkokeräimiä. Keräinten ylijäämälämpö johdetaan lämpökaivoon, mikä lämmittää siellä virtaavaan nesteen. Maanpinnan lämpötiloissa havaitaan selvä nousu aina, kun aurinkokeräimistä tuleva ylimääräinen lämpö johdetaan porakaivoon. Pelkän maaläm-

pömpun tapauksessa maanpinnan lämpötila vain laskee. Maanpinnan keskimääräinen lämpötilaero on 1,2 °C aurinkokeräimellä avustetun maalämpöpumpun hyväksi verrattuna tavalliseen maalämpöpumppuun. Tutkimuksessa lämpöpumpun hyötysuhde parani 10 % verrattuna alkuperäiseen.

Chen Xi, Lu Lin, Yang Hongxingin [8] tutkimuksessa käsiteltiin aurinkokeräimellä avustetun maalämpöpumppujärjestelmän lämpövaraston pitkäaikaisia vaikutuksia rakennuksen ja käyttöveden lämmittämiseen. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että pitkäaikaisen rakennuksen lämmityksen tehokkuus (Coefficient Of Performance eli COP) on 3.89 ja näin ollen COP parani 26,3 % verrattuna perinteiseen maalämpöpumppujärjestelmään. Jos käyttövesi ja maanpinnan lataus otetaan huomioon, järjestelmän hyötysuhde COP on 3.17, mikä on 3 % suurempi kuin tavallisen maalämpöjärjestelmän COP 3.08. Maanpinnan lämpökuorman tasapaino saadaan pidettyä kunnossa porakaivon lämmittämällä ei-lämmityskauden aikana paljon lämmitystä vaativissa maalämpöjärjestelmissä. Samasta asiasta on maininnut myös Enyu Wang et al omassa tutkimuksessaan. 20 vuoden aikana maanpinnan lämpötila putosi viidestä asteesta alle asteeseen tavallisella maalämpöjärjestelmällä. Se alkaa vaikuttaa suuresti lämpöpumpun toimintaan. Aurinkokeräinten avulla maanpinnan lämpötila pysyy koko simuloinnin ajan noin kuudessa asteessa. Aurinkoenergialla voidaan tuottaa 22 % koko lämmitysmäärästä. Tutkimuksessa todetaan myös, että porakaivon pituutta voidaan lyhentää 3,67 m jokaisesta yhden neliön aurinkokeräintä kohden. Radin, Fungin ja Leongin tutkimuksessa mainittiin myös porakaivon lyhentyminen. Heidän tutkimuksessaan lyhentyminen oli noin viisi metriä yhtä neliötä keräintä kohden.

Elisabeth Kjellssonin, Göran Hellströmin ja Bengt Perersin [9] tutkimuksessa esitellään maalämpöpumpun ja aurinkokeräinten erilaisia järjestelmäkombinaatioita asuinrakennuksissa. Niiden simulointitulokset on tuotettu TRNSYS-ohjelmalla. Tutkimuksen perusteella optimaalisin järjestelmä tuottaisi lämpimän käyttöveden kesäaikaan aurinkokeräimillä ja lataisi porakaivoa talviaikaan. Tutkimuksessa todetaan, että porakaivon lataaminen aurinkokeräimillä nostaa järjestelmän energian kulutusta johtuen kiertopumppujen käymisestä. Tutkimuksessa on kaksi erilaista järjestelmää. Toisessa aurinkokeräin on kytketty lämminvesivaraajaan ja tuottaa lämmintä käyttövettä. Maalämpöpumppu tuottaa muun tarvittavan lämmön. Se toimii myös lisälämmön lähteenä aurinkolämmölle, jos keräimistä ei saada tarpeeksi energiaa lämmittämään lämminvesivaraaja. Maa-

lämpöpumppu voidaan sulkea kesällä, kun aurinkolämpö tuottaa tarvittavan lämpimän käyttöveden. Sulkemalla maalämpöpumppu voidaan pidentää sen käyttöikää, kun maalämpöpumpun useat käynnistymiset ja sammumiset minimoidaan. Toisessa järjestelmässä aurinkokeräin on yhdistetty lämpöpumppuun. Tällöin keräintä voidaan käyttää rakennuksen ja käyttöveden lämmittämiseen, lämpöpumpun höyrystimen ja porakaivon lämmittämiseen. Parhaimman hyötysuhteen lämpöpumpulle sai simulointitapaus, jossa kaikki aurinkolämpö johdettiin suoraan porakaivoon. Artikkelissa mainitaankin, että kausittainen suorituskerroin eli SPF-kerroin olisi aina mainittava COP-luvun yhteydessä. Näin tuloksia pystyttäisiin paremmin arvioimaan. Tutkimuksen mukaan on energiatehokkaampaa käyttää kesällä aurinkolämpö käyttöveden tuottamiseen kuin porakaivon lataamiseen. Kun järjestelmä on oikein mitoitettu, porakaivon lämpiäminen kuluttaa yhtä paljon energiaa kuin siitä saatu hyöty on. Tutkimuksessa todetaan, että porakaivoon tuotettu lämpö häviää siitä nopeasti ja siihen syötetty lämpö pitäisi käyttää nopeasti.

Muhammad Waseem Ahmad et al [10] tutki artikkelissaan talojen energiakulutuksen pienentämistä aurinkokeräin yhdistettynä lämpöpumppuun. Tarkoituksena on huolehtia hyvästä sisäilmasta, pienentää lämmitykseen ja käyttöveden lämmittämiseen käytettyä energiaa. Tämä saatiin toteutettua optimoimalla lämpöpumpun toiminta, integroimalla aurinkokeräin järjestelmään ja siirtämällä energiankulutus halvempaan yösähköön. Tutkimuksessa testattiin myös perinteistä on-off-säädintä ja monen muuttujan mallipohjaisista ennustavaa säädintä (MPC) useissa eri ilmasto-olosuhteissa. Tuloksista selvisi, että MPC-säädin pystyi paremmin säätämään sisäilmaa ja käyttämään vähemmän energiaa. Sen käyttö oli helpompaa kulutuksen siirrossa yösähköön ja lämpöenergian varastoimisessa lämminvesivaraajaan. MPC-säädin tuotti 9 % energian säästön verrattuna on-off-säätimeen ja aiheutti vähemmän heilahteluja lämpötiloissa.

Xiao Wang et al [11] tutkivat kylmällä alueella sijaitsevaan omakotitaloon asennettua aurinkokeräin avustettua maalämpöpumppua, jossa oli auringon kausittainen lämpövarasto. Tutkimuksessa saatiin selville, että aurinkokeräimen tuottama lämpö oli 49,7 % kokonaislämpömäärästä. Maalämmön maasta ottama lämpö oli 75,5 %, mitä aurinkokeräimistä oli maahan syötetty.

Carbonell et al [12] tutkivat keräinten kytkemistä sarjaan ja rinnan ilma/maalämpöpumpun kanssa eri rakennuksissa Keski-Euroopan ilmastossa kahden eri

simulointiohjelman avulla, TRNSYS-17- ja Polysun-6-ohjelmalla. Tuloksista selviää, että lämpöpumppu ja aurinko vähentävät energian kulutusta verrattuna pelkästään lämpöpumppuun. Maalämmöllä on suurempi energian vähennys kuin ilmalämpöpumpulla. Keräimet yhdistettynä ilmalämpöpumppuun järjestelmän kausisuorituskykykerroin SPF-luku pienenee verrattuna referenssikohteeseen. Tämä vaikuttaa varsinkin energiatehokkaissa taloissa. Tämä johtuu siitä, että aurinkolämpö kattaa osan lämmöntuotosta silloin kuin ilmalämpöpumppu on parhaimmillaan eli keväällä ja kesällä. Järjestelmän SFP-luku suurenee 15.13 - 53.13 prosenttia, koska lämmön toimitus on suurempaa kuin energian kulutus johtuen auringon ilmaiskäytöstä. Kun keräimet tuottavat lämpimämpää käyttövedettä, niin lämpöpumpun käyttöaika pienenee. Maalämmöllä lämpöpumpun SPF-kerroin suurenee 11,70 - 62,90 prosenttia, kun järjestelmään lisätään keräimet. Tämä johtuu siitä, että lämpöpumppu käynnistyy harvemmin ja tuottaa vähemmän korkeamman lämpötilan käyttövedettä.

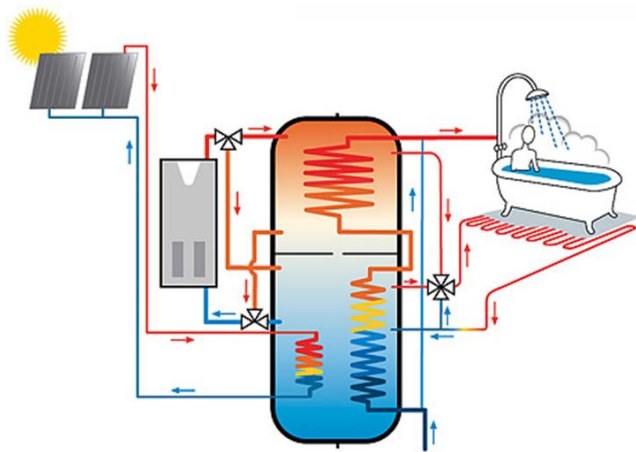
3 SIMULOINTIYMPÄRISTÖN KUVAUS

Luvussa esitellään työssä käytetyn lämmitysjärjestelmän toimintaa ja TRNSYS-ohjelman komponentteja. Luvussa esitellään myös usealla eri lämmönlähteellä lämpiävän lämminvesivaraajan toimintaa ja sen eri käyttötilanteita.

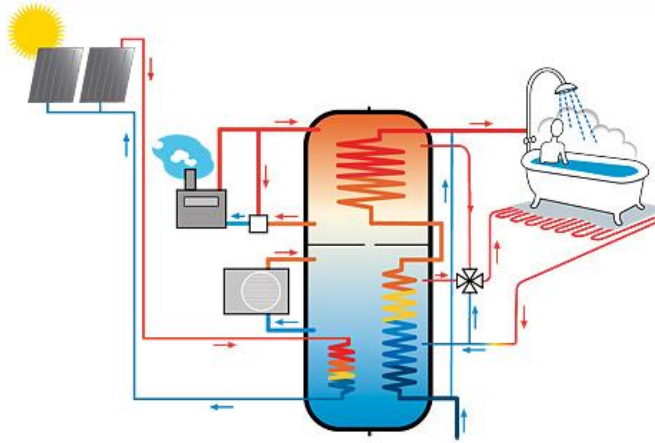
3.1 Hybridivaraaja

3.1.1 Yleistä

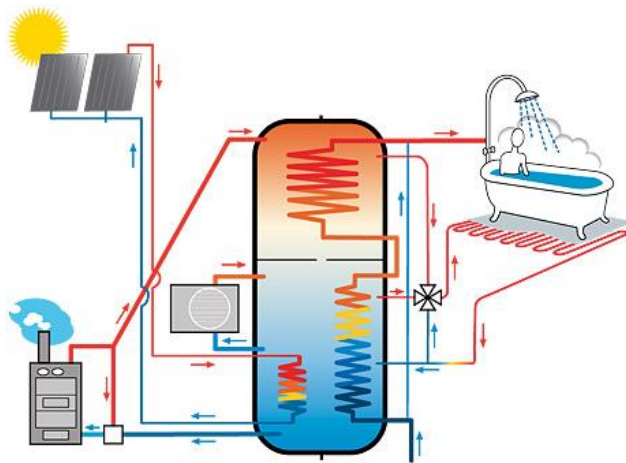
Hybridivaraaja käyttää useaa eri lämmönlähdettä lämmityksen ja käyttöveden tuottamiseen. Lämmön lähteet ovat useimmiten uusiutuvia energiamuotoja. Hybridivaraajan avulla saadaan hyödynnettyä heikompitehoista lämmönlähdettä pääasiallisen lämmönlähteen apuna. Hybridivaraajaa voidaan lämmittää aurinkokeräimillä, vesitakalla, puu-, pelletti- sähkö- tai öljykattilalla, tuulivoimalla tai ilma-vesi- tai maalämpöpumpulla erilaisina yhdistelminä. Kuvissa 2, 3, 4 on esitetty eri lämmönlähteiden kytkeminen hybridivaraajaan.



Kuva 2 Akvatermin hybridilämminvesivaraaja Akva Geo Solar lämpöpumpulla ja aurinkokeräimillä [13]



Kuva 3 Akvatermin hybridivaraaja Akva Geo Solar ilmavesilämpöpumpulla, vesitakalla ja aurinkokeräimillä [13]



Kuva 4 Hybridivaraaja Akva Geo Solar ilmavesilämpöpumpulla, puukattilalla ja aurinkokeräimillä [13]

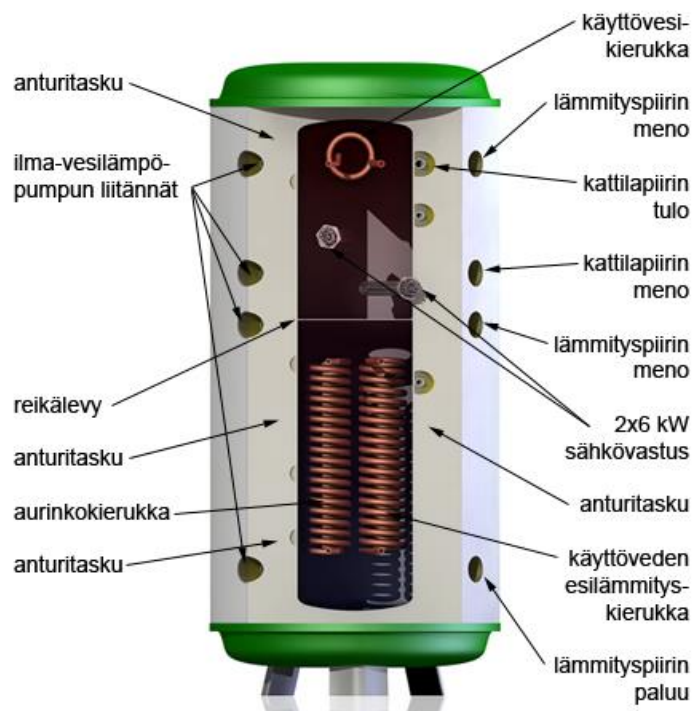
Rakennuksen lämmitysjärjestelmänä hybridivaraaja-järjestelmässä on useimmiten vesikiertoinen lattialämmitys, koska sille riittää alhaisempi lämpötila verrattuna vesikiertoiseen patteriverkostoon. Näin ollen heikompitehoinen lämmönlähde riittää lämmittämään lattialämmitykseen tarvittavaa nestettä.

Kun hybridivaraajaan on kytketty aurinkokeräimet, voidaan kesäaikaan pelkästään niillä lämmittää käyttövesi. Talviaikaan, kun auringon säteily ei riitä lämmittämään keräintä tarpeeksi, voidaan lisälämmönlähteenä käyttää jotain muuta lämpölähdettä kuten maalämpöä tai öljyä.

3.1.2 Rakenne

Hybridivaraajan toiminnassa on tärkeää varaajassa tapahtuva lämpiävän veden kerrostuminen. Tällä tavoin varaajasta saadaan oikean lämpöistä vettä käyttötarkoituksiinsa. Tämä on myös tärkeää lämpöpumpun toiminnan taloudellisuuden kannalta. [14]

Hybridivaraajia on kahdenlaisia. Toinen malli koostuu yhtenäisestä säiliöstä, joka jaetaan lämmönkerrostumislevyllä kahteen osaan. Lämmennyt vesi nousee varaajassa ylöspäin ja viilennyt vesi, joka on lämpönsä luovuttanut, valuu alaspäin. Aurinkolämpöä käyttävä kierukka sijoitetaan varaajan alaosaan, jotta sen matalampi energiataso pystytään hyödyntämään paremmin [15]. Käyttöveden esilämmityskierukka sijaitsee varaajan alaosassa ja käyttöveden jälkilämmityskierukka varaajan yläosassa. Käyttövesi tarvitsee kuumemman lämpötilan kuin lattialämmitys, jonka takia käyttövesikierukka sijaitsee varaajan yläosassa. Varaajassa on myös yksi tai useampi sähkövastus energia-
piikkeihin, jos järjestelmä ei pysty tuottamaan tarpeeksi energiaa varaajan lämmittämiseen. Kuvassa 5 on esitetty Oilonin hybridivaraaja.



Kuva 5 Oilon-hybridivaraaja [16]

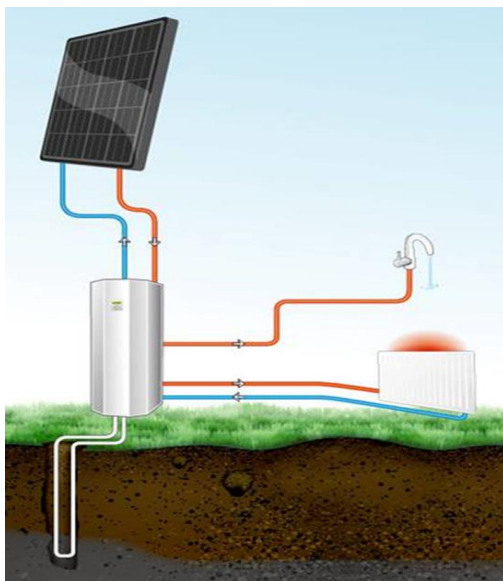
Toinen varaajatyyppe koostuu kahdesta sisäkkäisestä säiliöstä. Varaajan sisällä on pienempi säiliö käyttövedelle käyttövesikierukoiden tilalla. Ulompi säiliö lämmittää lämmityspiirin kiertoveden ja sisempi säiliö käyttöveden. Kahden säiliön sisäkkäisessä mal-

lissa käyttöveden säiliö on pieni (Jäspín mallissa 160 - 200 L) ja kuumaa vettä riittää vähemmän käytettäväksi kerralla. Varaajaa joudutaan lämmittämään useammin, mutta käyttövesi saadaan lämmitettyä matalammalla lämpötilalla perinteiseen käyttövesivaraajaan verrattuna [14].

3.2 Käyttötilanteet

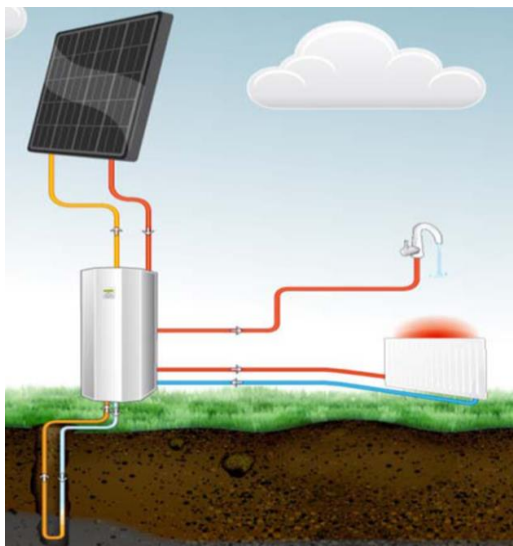
Tässä kappaleessa esitellään hybridivaraajan toimintaa eri käyttötilanteissa.

Aurinkoisella ilmalla aurinkokeräimestä tulevan nesteen ollessa yli 55 °C riittää se yksin lämmittämään lämminvesivaraajassa olevaa vettä. Tällöin maalämpöpumppu on poissa päältä ja järjestelmä hyödyntää pelkästään aurinkokeräintä. Kuvassa 6 on esitetty järjestelmän toiminta pelkän aurinkokeräimen avulla.



Kuva 6 Aurinkokeräimen kautta kaikki lämpö järjestelmään [17]

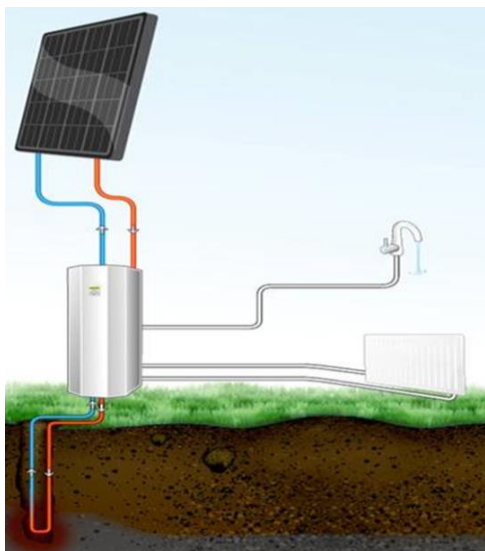
Pilvisellä säällä aurinkokeräimessä kiertävän nesteen lämpötila ei nouse riittävästi, jotta se riittäisi yksinään lämmittämään lämminvesivaraajaa. Aurinkokeräimestä tulevan nesteen lämpötila on silloin alle 55 °C. Tällöin maalämpöpumppu ja sen kiertopumput käynnistyvät. Kuvassa 7 on esitetty aurinkokeräimen ja maalämpöpumpun yhteistoiminta.



Kuva 7 Aurinkokeräimen ja maalämpöpumpun yhteiskäyttö [17]

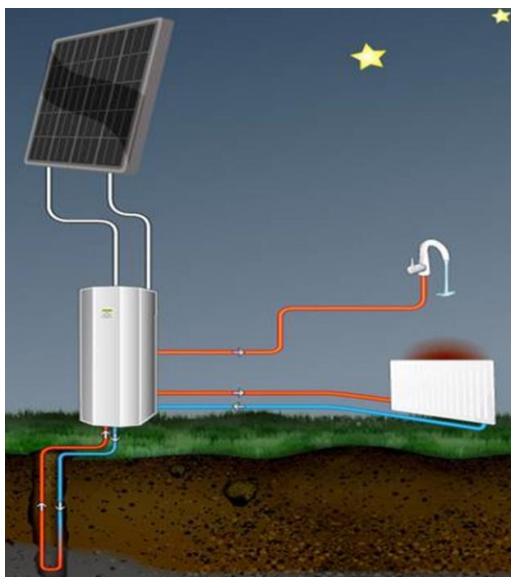
Systeemissä, jossa aurinkokeräin on yhdistetty suoraan maalämpöpumppuun, voi aurinkokeräin vähäisen auringon säteilyn aikaan esilämmittää keruupiiristä tulevaa nestettä ennen sen siirtymistä lämpöpumppuun. Tällä tavoin saadaan lämpöpumpun hyötysuhdetta parannettua 10 % Taon, Jialing ja Wein [7] s. 157] tutkimuksen mukaan.

Toisaalta aurinkokeräimessä kiertävän nesteen lämpötilan noustessa liian korkealle täytyy kiertävää nestettä jäähdyttää. Aurinkokeräimen kiertopumppu voidaan sammuttaa, jolloin keräimen kautta ei enää kulje nestettä ja kiertävä neste viilenee. Ylimääräinen lämpö voidaan myös johtaa maalämpöpumpun keruuputkistoon, jolloin keruuputkistossa kiertävä neste lämmittää putkistoa ympäröivää maata sen sijaan, että keräisi maahan varastoitunutta lämpöä normaaliin tapaan. Tällä tavalla maahan varastoitunut ylijäämälämpö voidaan käyttää myöhemmin hyväksi ja lämpöpumpun hyötysuhdetta parantaa. Kuvassa 8 on esitetty keräimen ylijäämälämmön varastointi maahan. Jos aurinkokeräimessä kiertävää nestettä ei viilennetä tavalla tai toisella, voisi neste ylikuumentua ja rikkoa keräimen.



Kuva 8 Aurinkokeräimen jäähdytys ja ylijäämä lämmön varastointi maahan [17]

Kun aurinkokeräimestä ei saada lämpöä ja keräimen pumppu on pois päältä, maalämpöpumppu toimii yksinään ja lämmittää lämminvesivaraajassa olevan veden. Tämä on esitetty kuvassa 9.

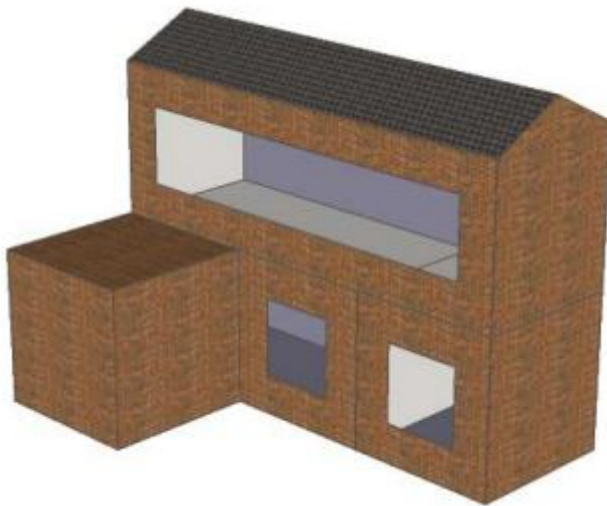


Kuva 9 Pelkän maalämpöpumpun käyttö [17]

Jos maalämpöpumpun tuottama lämpömäärä ei riitä lämmittämään lämminvesivaraajaa tarpeeksi, niin varaajan sähkövastus käynnistyy. Tämä tuottaa tarvittavan lisälämmön.

3.3 Rakennuksen tiedot

Simuloinnissa käytettiin hyväksi aiemmin tehtyä Heikkilän simulointimallia [3]. Rakennus on TRNSYS-ohjelmalla luotu 3D-rakennusmalli, mikä on esitetty kuvassa 10. Rakennuksessa on kaksi kerrosta ja harjakatto. Siinä on kolme tilaa ja lisäsiipi, joka toimii simuloinnissa varjostinosana päärakennukselle. Yläkerta on mallinnettu yhdeksi tilaksi ja alakerrassa on kaksi erikokoista tilaa. Varjostinosa on kuutionmuotoinen, joka on liitetty pohjakerrokseen. Se on yhtä korkea kuin pohjakerros. Rakennukseen ei ole mallinnettu lainkaan ovia. Kaikki ikkunat sijaitsevat eteläjulkisivulla. Rakennuksen kokonaispinta-ala on 96 m^2 ja kokonaistilavuus 408 m^3 . Liitteessä C on esitetty tarkemmat mitat, huoneiden pinta-alat ja tilavuudet. Lämpökapasiteettiarvot on esitetty taulukossa 1. Rakennuksen tietoja ei ole muutettu alkuperäiseen verrattuna. Sen käyttötarkoitusta, laitteiden ja henkilöiden määrää ei myöskään muutettu.



Kuva 10 Simuloitava rakennus [4]

Taulukko 1 Rakennusmallin tilojen pinta-alat, tilavuudet ja lämpökapasiteetit [4]

	Sijainti	Pinta-ala $A \text{ [m}^2\text{]}$	Tilavuus $V \text{ [m}^3\text{]}$	Kapasiteetti $C_p \text{ [kJ/K]}$
Tila 1	Alakerta, länsi	32	128	773
Tila 2	Alakerta, itä	16	64	387
Tila 3	Yläkerta	48	216	1305

Lämmitysjärjestelmänä on vesikiertoinen lattialämmitys. Simulointimallissa lattialämmitys on asennettu alakerran länsipuoleiseen huoneeseen. Simuloinnissa muihin tiloihin asetettiin lämpötilan asetusarvot, jonka mukaan tilaa lämmitetään tai jäähdytetään. Tarkempi kuvaus on esitetty Heikkilän työssä [3].

3.4 Lähtökohta

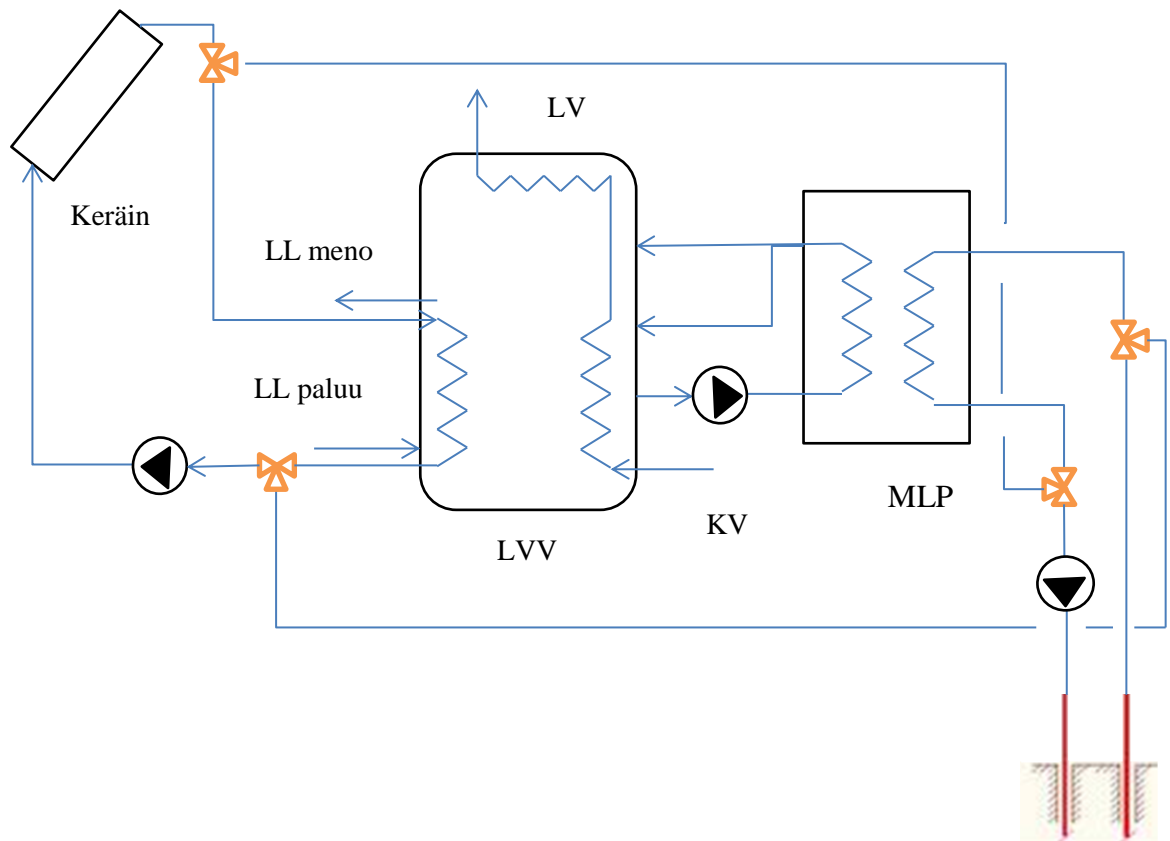
Työn teknisenä lähtökohtana on ollut Heikkilän diplomityö. Hän suunnitteli kaksi erillistä lämmitysjärjestelmää, joista toinen perustui maalämmölle ja toinen aurinkolämmölle. Molempia ohjattiin termostaattien avulla. Aurinkojärjestelmän pumppu kytkeytyi päälle, kun aurinkokeräimestä lähtevän nesteen lämpötila on $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ astetta korkeampi kuin lämminvesivaraajan alaosan lämpötila. Aurinkojärjestelmän lämminvesivaraajassa oli kaksi sähkövastusta, alempi 4 kW lämmitykselle ja 3 kW käyttöveden jälkilämmitykselle. Maalämmön lämminvesivaraajassa oli yksi 6 kW sähkövastus. Maalämpöpumppua ohjataan lämmityksen termostaatilla, joka sijaitsee varaajan keskikohdassa. Varaajan keskikohdan lämpötilan laskiessa alle $52,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen, termostaatti kytkee maalämpöpumpun päälle. Lämpötilan noustessa takaisin $57,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ asteeseen, maalämpöpumppu menee pois päältä. Varaajan yläosassa sijaitseva termostaatti ohjaa sähkövastuksen päälle, jos varaajan yläosan lämpötila laskee alle $57,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen. Lämpötilan noustessa takaisin $62,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ asteeseen termostaatti kytkee vastuksen pois päältä.

Mäkinen [4] kehitti Heikkilän työtä eteenpäin ja kehitti ohjelmakoodin maalämpöpumpun käynnistymiseen. Ohjelmakoodi otti huomioon sähkön hinnan vaikutuksen maalämpöpumpun käynnistymisajankohdan laskennassa. Mäkinen ohjelmakoodin tarkoituksena on siirtää maalämpöpumpun käynnistymistä kalliimman sähkön hinnan aikana. Tämä ohjelmakoodi on ollut perustana tässä diplomityössä toteutettuun järjestelmien

yhteiseen ohjelmakoodiin. Tässä työssä Heikkilän ja Mäkisen järjestelmiä kehitetään edelleen siten, että maalämpöpiiri, aurinkolämpöpiiri sekä sähkölämmitys liitetään samaan vesivaraajaan ja ne muodostavat yhden järjestelmän. Kaikki kolme energialähdettä syöttävät lämpöä samaan vesivaraajaan. Niille kehitetään yhteinen Fortran-ohjausohjelma, joka säättää samanaikaisesti kaikkien kolmen piirin toimintaa sekä ohjaa lisäksi rakennuksen lattialämmitystä.

3.5 Yhdistetyn lämmitysjärjestelmän kuvaus

Työssä käytetty yhdistetty lämmitysjärjestelmä koostuu ohjausohjelmasta, lattialämmityspiiristä, käyttövesipiiristä, lämminvesivaraajasta, aurinkokeräinpiiristä ja maalämmön keräys- ja latauspiiristä. Kuvassa 11 on esitetty ohjattavan lämmitysjärjestelmän rakenne. Kuvassa aurinkopiiri kiertää maalämpöpiiriin keräimen jäähdytystilanteessa. Jos piirit ovat erilliset, kuvassa olevia venttiileitä ei ole.



Kuva 11 Yhdistetyn lämmitysjärjestelmän rakenne

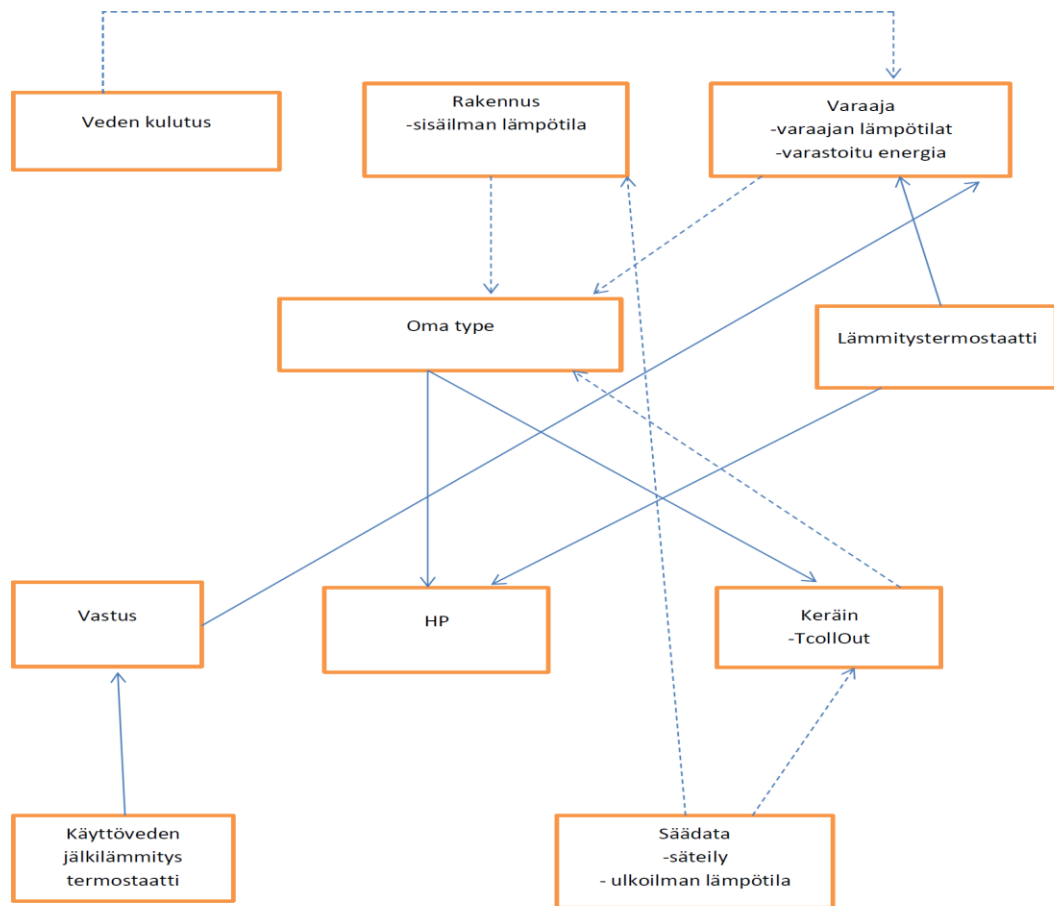
TRNSYS-ohjelma koostuu komponenteista, joita kutsutaan *Typeiksi*. Liitteissä F ja G on esitetty TRNSYS-ohjelman pelkistetty näkymä simulointimallista. Niistä on poistet-

tu simulointitilanteessa käytetyt tulostimet ja laskurit, joiden tehtävä on tuottaa simuloinnissa tulevat tiedot ja tulokset. Liite F kuvaa aurinko- ja maalämmön toimintaa omina piireinään ja liite G kuvaa aurinkopiirin kiertoa venttiileiden kautta maalämpöpiiriin jäähdyttämällä aurinkokeräimessä kiertävää nestettä sen kuumentuessa liikaa.

Lattialämmityspiiri koostuu lämmitysputkistosta (*Type 31b*), kiertopumpusta (*Type 114*), termostaattiventtiilistä (*Type 11b*), haarasta (*Type 11h*), huonetermostaatista (*Type 698*) ja lattiatermostaatista (*Type 654*). Se on kytketty lämminvesivaraajaan. Sitä ohjataan kahden termostaatin avulla. Huonetermostaatti on säädetty pitämään huonelämpötila $21,5^{\circ}\text{C}$ asteessa. Lattiatermostaatin tarkoituksena on pitää lattiapinnan lämpötila 29°C asteessa. Kun huoneen sisälämpötila laskee $20,5^{\circ}\text{C}$ asteeseen ja lattian lämpötila laskee alle 29°C asteen, kytkeytyy lattialämmityksen kiertopumppu päälle. Pumppu pysyy päällä, kunnes huonelämpötila nousee $22,5^{\circ}\text{C}$ asteeseen tai lattialämpötila nousee yli 29°C . Lattialämmityksen kiertoveden lämpötila pyritään pitämään 35°C asteessa. Termostaattiventtiili sekoittaa varaajalta tulevan nesteen ja lattialämmityspiiristä palaavan nesteen asetettuun 35°C asteeseen. Termostaattiventtiilin toiminta on esitetty tarkemmin Heikkilän työssä [3].

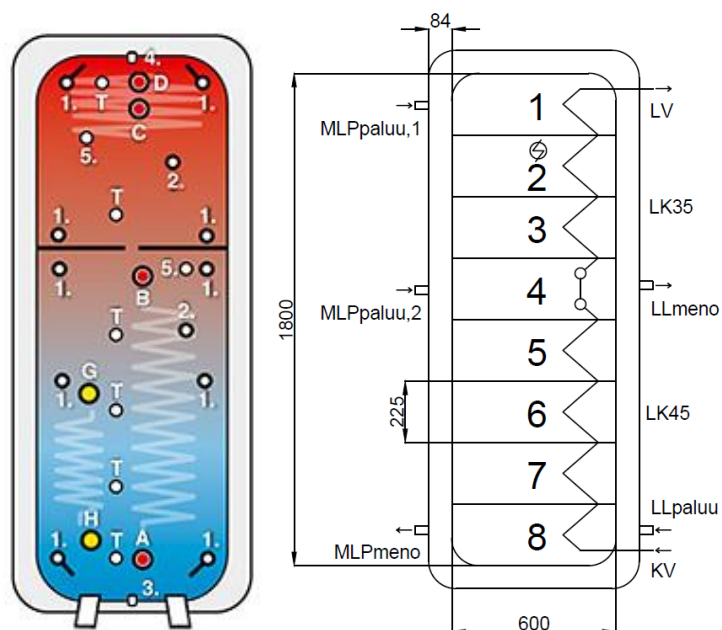
Aurinkopiiri koostuu kolmesta $2,5\text{ m}^2$ aurinkokeräimestä (*Type 1c*), 27 W kiertopumpusta (*Type 114*), 30 m keräysputkistosta (*Type 709*) ja ohjausyksiköstä. Aurinkopiiri saa säteilytiedot säätiedostosta. Aurinkopiirin kiertopumppua ohjataan järjestelmän yhteisellä ohjausohjelmalla. Maalämpöpiiri koostuu $5,9\text{ kW}$ lämpöpumpusta (*Type 668*), lämmön keruupiirin 90 W pumpusta (*Type 114*), 110 m syvästä porakaivosta (*Type 557a*) ja 20 m keräysputkistosta, lämmön latauspiirin 30 W pumpusta ja latausputkistosta ja järjestelmän ohjausyksiköstä. Maalämpöpumppua ohjataan termostaatilla ja työssä kehitetyllä ohjelmakoodilla. Työssä näille piireille on kehitetty yhteinen ohjausyksikkö (*Type 264*).

Kuvassa 13 on esitetty järjestelmän vuokaavio. Kuvassa on esitetty järjestelmät ja niiden vaikutussuhteet. Katkoviivat kuvaavat laiteille annettavia syöttötietoja ja yhtenäiset viivat kuvaavat laitteiden ohjauskäskyjä.



Kuva 12 Yhdistetyn lämmitysjärjestelmän vuokaavio

Aurinkojärjestelmällä on oma piirinsä lämminvesivaraajan sisällä. Tämä johtuu siitä, että aurinkokeräimissä kiertää vesi-glykoliseos kiertonesteeseen jäätyminen estämiseksi. Omana piirinään ollessaan vesi-glykoliseos ei pääse sekoittumaan lämpimään käyttöveeseen. Kuvassa 13 on esitetty Akvatermin Geo Solar- lämminvesivaraaja, joka vastaa työssä käytettyä Oilonin AWB-hybridivaraajaa. Mäkisen työssä käytettiin toista vesivaraajaa, jonka lämmöntuotto toteutettiin maalämmöllä ja sähköllä. Aurinkoenergiaa varten tarvitaan oma lämmönsiirrin, minkä vuoksi on valittu hybridivaraaja.



Kuva 13 Akva Geo Solar [13] ja Mäkisen [4] käyttämän lämminvesivaraajan rakenne

Lämmitysjärjestelmässä käytetty 500 L hybrid-lämminvesivaraaja koostuu kolmesta lämmityskierukasta, yksi kierukka aurinkokeräintä varten ja kaksi lämmintä käyttövettä varten. Käyttöveden esilämmityskierukan malli on LK45, jotta lämmönsiirtyminen on tehokasta myös varaajan alaosan alemmilla lämpötiloilla. Käyttöveden jälkilämmityskierukka on mallia LK35. Aurinkokierukan malli on LK45. Varaajassa on myös sähkövastus, jolla lämmitetään varaajan yläosan käyttövesi, jos maalämpöpumpun ja aurinkolämmön tehot eivät riitä lämmittämään sitä tarpeeksi. Sähkövastuksen teho on 3 kW ja sen massavirraksi asetettiin maalämpöpumpun latauspiirin virtaama 774 kg/hr. Sähkövastus saa ohjaussignaalin varaajan yläosassa olevalta termostaatilta. Aurinko- ja esilämmityskierukan halkaisija on 160 mm ja jälkilämmityskierukan halkaisija on 400 mm.

Taulukko 2 Aurinko- ja käyttövesikierukoiden mitat ja ominaisuudet [18], [19]

Malli	Teho [kW]	Maksimivirtaama q_{max} [l/s]	Putken pituus L [mm]	Kierukan ulkopinta-ala A [m ²]
LK35	90	0,58	9,4	2,3
LK45	120	0,75	12,2	3
LK60	150	1,0	18,8	4,7

Lämminvesivaraaja jaettiin kahdeksaan solmupisteeseen. Heikkilän [3] ja Mäkisen [4] töissä on esitetty tarkemmin lämminvesivaraajan jako solmupisteisiin TRNSYS-ohjelmassa. Simuloinnissa käytetty lämminvesivaraaja on muuten samanlainen kuin Heikkilän ja Mäkisen työssä, mutta varaajaan on lisätty aurinkokierukka aurinkolämpöpiiriä varten. Liitteessä D on Oilonin hybridivaraajan tarkemmat mitat ja yhteiden paikat. Lämminvesivaraajassa on kolme sisääntuloa, yksi lattialämmitykselle ja kaksi maalämpöpumpulta tulevaa varaajan latausyhdetä. Varaajassa on kaksi ulostuloa. Lattialämmityksen paluuvesi tulee solmupisteeseen 8, joka sijaitsee varaajan pohjassa. Lattialämmityksen menovesi lähtee solmupisteestä 4, joka sijaitsee varaajan keskikohdassa. Varaajan lataus tapahtuu solmupisteessä 1 tai 4 riippuen maalämpöpumpulta tulevan nesteen lämpötilasta. Maalämmön latauspiirin paluuvesi lähtee solmupisteestä 8 riippumatta siitä, mihin solmupisteeseen vesi on tullut. Käyttövesi tulee varaajan solmupisteestä 8. Esilämmityskierukassa lämmennyt käyttövesi virtaa solmupisteestä 4 jälkilämmityskierukkaan varaajan solmupisteessä 2. Käyttövesi poistuu varaajasta solmupisteestä 1. Sähkövastus sijaitsee solmupisteessä 2.

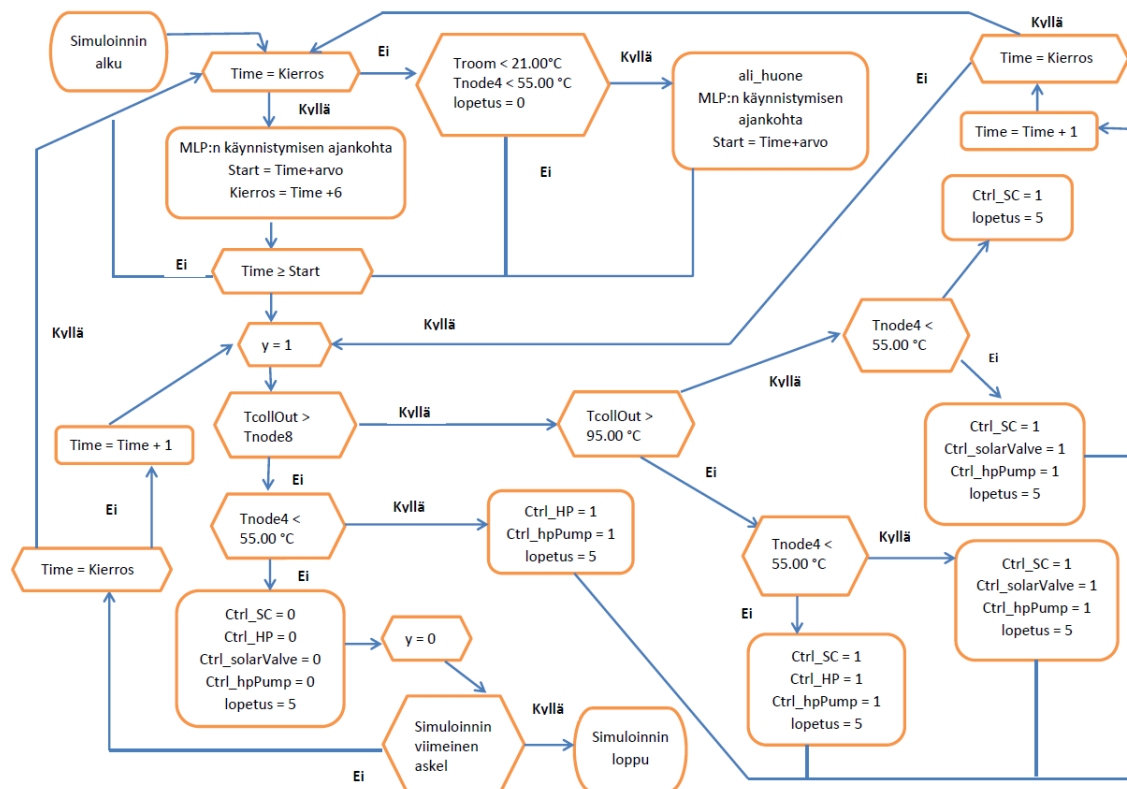
Aurinkojärjestelmä on yhdistetty maalämmön keruupiiriin venttiileiden kautta. Aurion säteilyn ollessa riittävä sekä varaajan ollessa täyteen ladattu tai aurinkokeräimestä tulevan nesteen lämpötilan ollessa liian korkea, venttiilit avautuvat ja keräimestä tuleva neste kiertää maalämmön keruupiirin kautta takaisin aurinkokeräimeen ilman, että neste kiertää varaajan kautta. Tällä tavalla aurinkokeräimessä kiertävää nestettä saadaan jäähdytettyä ja ylimääräistä lämpöä ladattua maahan.

Lämmitysjärjestelmä saa simulointimallissa säätiedot sääkomponentilta, joka käyttää sääennusteena Metronormin TMY2 (*Typical Meteorological Year 2*) muotoista säätiedostodataa. Sääennusteiden avulla järjestelmää voidaan ohjata.

4 TYPE 264-OHJELMAN KUVAUS

4.1 Yleistä

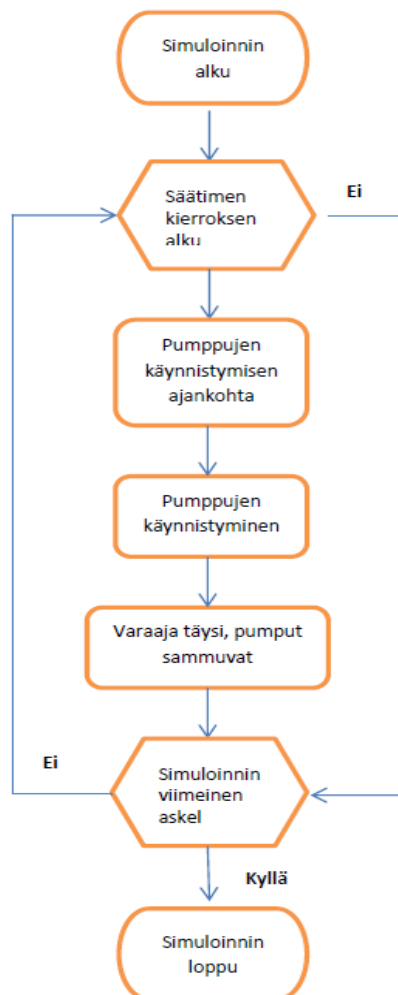
Tässä luvussa esitellään työssä käytetyn Type264-ohjelman toimintaa. Type 264-säädin rakentuu aiempien simulointimallien ja ohjelmakoodin ympärille [3], [4]. Ohjelmarunko luotiin käyttämällä Fortran 90-ohjelmointikieltä TRNSYS-ohjelman *Simulation Studion* avulla. Typen-ohjelmakoodi koostuu pääohjelmasta ja kolmesta aliohjelmasta. Pääohjelma koostuu laskurista, joka pitää pumput päällä kunnes raja-arvot saavutetaan. Laskuri muodostuu useasta IF-lauseesta, jotka antavat toimintakäskyn aurinkolämpö- ja maalämpöjärjestelmän laitteille. Toimintaperiaatteena on mitata varaajan keskikohdan ja alaosan lämpötilaa sekä aurinkokeräimestä ulostulevan nesteen lämpötilaa. Mittausten perusteella ohjataan aurinkolämpö- ja maalämpöjärjestelmän pumppujen toimintaa. Ohjauksen avulla järjestelmiä voidaan ohjata hallitusti. Kuvassa 14 on esitetty Type264-ohjelman vuokaavio.



Kuva 14 Type264-ohjelmakoodin vuokaavio

Kuvassa esitetty vuokaavio kuvaa yhdistetyn lämmitysjärjestelmän toimintaa. Siinä ei ole esitetty tilannetta, jossa maalämpöjärjestelmä ei mene päälle, mutta aurinkojärjestelmä käynnistyy auringon säteilyn ollessa riittävän voimakasta. Tällöin maalämpöpumpun käynnistymisajankohta *Start* on pienempi kuin aika *Time*. Ohjausohjelmaan on tehty tälle tapaukselle kiertotie, jota ei ole esitetty vuokaaviossa. Siinä tapauksessa tarkastetaan varaajan sekä keräimen lämpötilat ja toimitaan sen mukaan hypäten maalämpöpumpun käynnistymisen ylitse. Lopetus-apumuuttuja estää ohjelman jäämisen pumppimaan kahden toiminnon välillä. Lopetus-muuttujan avulla estetään pumppujen kytkeytyminen päälle ja pois lyhyen ajan sisällä ennen kuin varaaja on varattu täyteen.

Yhdistetyn järjestelmän ohjauslogiikka on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15 Yhdistetyn lämmitysjärjestelmän ohjauslogiikka [4]

Mäkisen [4] aiemmin kehittämän ohjelmakoodin tarkoituksena on vähentää maalämpöpumpun käynnistymistä korkean sähkön hinnan aikana. Tämä saadaan aikaan sähkön tuntihinnan, varaajan keskikohdan lämpötilan ja säätietojen ulkolämpötilan avulla. Varaajan keskikohdan lämpötilan avulla saadaan selville varaajan lämpöenergian määrä. Ulkolämpötilan avulla saadaan laskettua rakennuksen tarvitsema lämmitystehon tarve. Nämä ovat Mäkisen kehittämässä ohjauskoodissa ja ne sisältyvät myös tässä työssä kehitettyyn ohjauskoodiin.

Mäkisen kehittämä ohjausohjelma toimii kuuden tunnin kierroksina. Kierroksen alussa aika hetkellä 0 ohjelma määrittää maalämpöpumpulle käynnistymisajankohdan *Start* seuraavan kuuden tunnin sisällä varaajassa olevan lämpöenergian, sääennusteiden tai huonelämpötilan perusteella. *Arvo*-apumuuttuja on tuntien lukumäärä maalämpöpumpun (MPL) käynnistymiseen, jonka pääohjelma saa *Taulukoita*- tai *Ali_huone*-aliohjelmista. Maalämpöjärjestelmän pumpput ovat poissa päältä, kunnes käynnistymisajankohta *Start* saavutetaan. Tällöin simuloinnin aika *Time* on suurempi kuin *Start*. Pumpput pysyvät päällä, kunnes varaajan keskilämpötila on noussut asetusarvoonsa. Kierroksen aikana maalämpöpumppu voi käynnistyä vain kerran. Pumppujen sammuttua, ne pysyvät poissa päältä, kunnes uusi kierros alkaa.

Aliohjelma *Taulukoita* laskee varaajan keskikohdan lämpötilan perusteella varaajaan varastoituneen lämpöenergian määrän. Ulkolämpötilan ja sääennusteen perusteella aliohjelma laskee rakennuksen tarvitseman lämmitystehon tarpeen. Niiden perusteella aliohjelma määrittelee maalämpöpumpulle käynnistymistunnin *Arvo*. Maalämpöpumppu pysyy käynnissä niin pitkään kunnes varaajan keskilämpötila nousee yli 55 °C asteeseen.

Jos huonelämpötila laskee alle 21 °C asteen, niin aliohjelma *Ali_huone* käynnistää maalämpöpumpun seuraavan kahden tunnin aikana riippumatta siitä, minkä pääohjelma on laskenut käynnistymisajankohdaksi. Käynnistymistunti on apumuuttuja *Arvo*.

Aurinkokeräin saa säteilytiedot sääkomponentilta. Aurinkokeräimen pumppu käynnistyy ohjauksen antaessa käskyn, kun keräimestä tulevan nesteen lämpötila on riittävän korkea.

Aliohjelmien ja ohjauslogiikan toiminta on esitetty tarkemmin Mäkisen työssä [4].

4.2 Type 264-ohjausohjelman kuvaus

Type264-komponentissa käytettiin neljää syötettä: *Tnode4*, *Tnode8*, *TcollOut* ja *Troom*. Lisäksi käytettiin viittä ulostuloa: *Ctrl_SC*, *Ctrl_HP*, *Ctrl_solarValve*, *Ctrl_hpPump* ja *lopetus_1*. *Tnode4* on varaajan keskikohdan lämpötila ja *Tnode8* on varaajan alaosan lämpötila. *TcollOut* on keräimestä ulostulevan nesteen lämpötila ja *Troom* on huone-lämpötila. *Ctrl_SC* on aurinkokeräimen pumpun ohjaussignaali. *Ctrl_HP* on maalämpöpumpun ja sen latauspiirin pumpun ohjaussignaali. *Ctrl_solarValve* on aurinko- ja maalämmön keräyspiirien venttiileiden ohjaussignaali ja *Ctrl_hpPump* on maalämmön keräyspiirin pumpun ohjaussignaali. Ohjaussignaalit ovat On/Off-säätimiä. Ohjaussignaalit saavat arvon $\gamma=1$, kun laitteet kytkeytyvät päälle ja arvon $\gamma=0$ laitteiden kytkeytyessä pois päältä. *Lopetus_1*-apumuuttujan avulla voitiin tarkistaa, että ohjelma toteuttaa oikean if-lauseen.

Simuloinnin alkaessa *Type 264* saa lähtötietoina huonelämpötilan, varaajan keskikohdan ja alaosan lämpötilat sekä aurinkokeräimestä ulos tulevan nesteen lämpötilan. Jos aurinkokeräimestä tulevan nesteen lämpötila ylittää varaajan alaosan lämpötilan, keräin käynnistyy riippumatta siitä, missä vaiheessa ohjelman suoritusta ollaan.

Aurinkokeräinjärjestelmän pumppu on yksinään päällä, kun keräimestä ulos tulevan nesteen lämpötila nousee yli 95 °C asteen. Keräimestä tulevan nesteen lämpötilan noustessa yli 95 °C asteen, pitää tarkastaa varaajan lämpötila. Mikäli lämpötila on alle 55 °C astetta, voidaan keräimestä saatava lämpö syöttää varaajaan. Jos lämpötila on yli 55 °C astetta, syötetään lämpö maalämmön keräyspiiriin erillisten venttiileiden kautta. Tällöin keräimestä tuleva neste kiertää maalämmön keruupiirin kautta takaisin keräimeen eikä kierrä varaajan kautta sitä viilentäen. Varaajan ollessa täysi eli yli 55 °C astetta ja keräimestä ulostulevan nesteen lämpötilan ollessa suurempi kuin varaajan alaosan lämpötila, syötetään saatava lämpö maalämmön keräyspiiriin. Tällä tavalla aurinkokeräin ei pääse ylikuumenemaan auringon säteilyn ollessa voimakasta ja auringon säteily saadaan hyödynnettyä maanpinnan lämmittämiseen.

Maalämpöpumppu ja sen keräyspumput käynnistyvät, kun keräimestä ei saada lämpöä ja varaajan keskilämpötila on alle 55 °C astetta. Tällöin maalämpöjärjestelmä on yksinään toiminnassa. Keräimestä ulostulevan nesteen lämpötilan ollessa varaajan alaosa korkeampi ja alle 95 °C astetta sekä varaajan keskilämpötilan ollessa alle 55 °C astetta,

ovat sekä aurinkojärjestelmän pumppu että maalämpöjärjestelmän pumput päällä. Koko lämmitysjärjestelmä on poissa päältä, kun varaaja on täysi ja keräimestä ei saada lämpöä. Tällöin keräimestä ulostulevan nesteen lämpötila on alhaisempi kuin varaajan alaosan lämpötila.

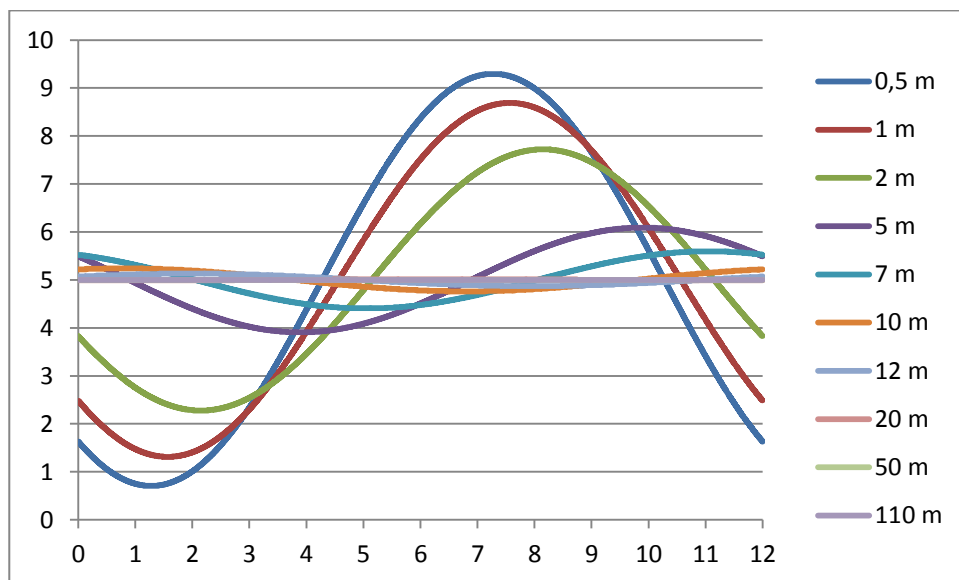
Aurinkokeräimessä kiertää vesi-glykoliseos, joka estää keräimen jäätymisen talvella. Työssä on oletettu, että vesi-glykoliseoksen jäätymispiste on riittävän alhainen, ettei seos voi jäätymä pumpun ollessa pois päältä. Näin ollen jäätymispistettä ei tarvitse huomioida Typen toiminnassa. Työssä on myös oletettu, ettei keräimessä kiertävä neste kuumene kiehumispisteeseensä. Sen vuoksi sitä ei huomioida Typen toiminnassa.

5 YHDISTETYN JÄRJESTELMÄN TOIMINNAN TESTAUS JA DEMONSTROINTI

TRNSYS:n simuloinnilla saatujen tulosten mukaan simuloitavan tilan lämmitysenergian tarve on noin 5818 kWh vuodessa. Se koostuu rakenteiden läpi johtumisen kautta tulevasta lämpöhäviöstä, ilmapuodoista ja ilmanvaihdosta. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 [20] mukaan pientalon lämpimän käyttöveden ominaiskulutus on $600 \text{ dm}^3/\text{m}^2$ vuodessa. Lämmitysenergian tarve on tällöin $35 \text{ kWh}/\text{m}^2$ vuodessa. Simuloitavan rakennuksen lämpimän käyttöveden lämmitysenergian tarve on tällöin 3360 kWh vuodessa.

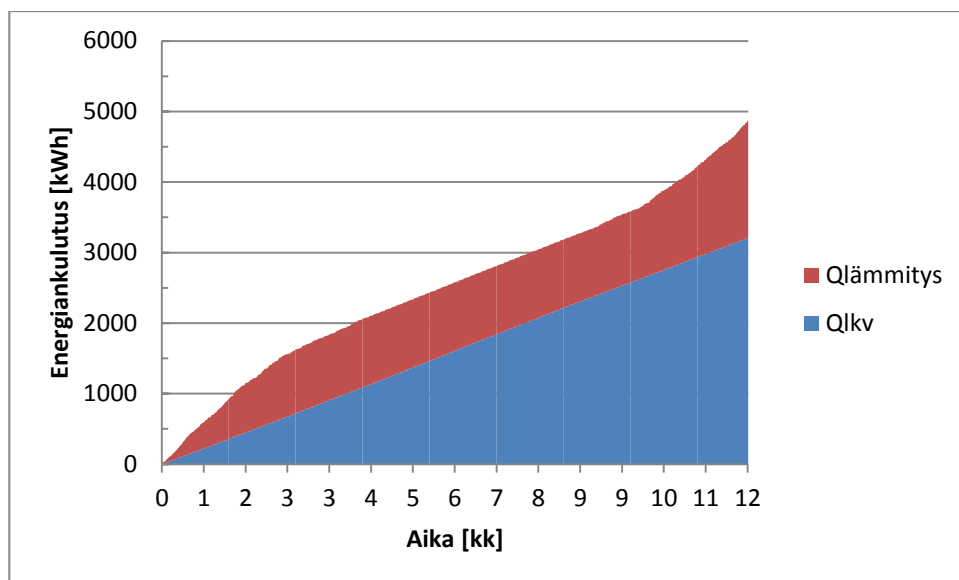
5.1 Aurinkopiirin kierto maalämmön keruupiiriin

Aurinkopiirin kiertäminen maalämpöpiiriin on niin vähäistä, että sillä ei ole vaikutusta lämpökaivon lämpötiloihin. Aurinkopiirin kierrolla on jäähdyttävä vaikutus aurinkokeräimeen ja estää näin ollen keräimen ylikuumentumisen. Kuvassa 16 on esitetty maanpinnan lämpötilat vuoden aikana. Lämpötilat ovat samat molemmilla järjestelmillä sekä vertailukohteella. Maanpinnan lämpötila kohoaa korkeimmillaan 9,29 asteeseen heinäkuussa. Lämpötila laskee matalimmilleen helmikuun alussa. Lämpötilat palaavat lähtölämpötiloihinsa vuoden lopussa, joten lämmönsiirtymistä ei tapahdu vuoden aikana.



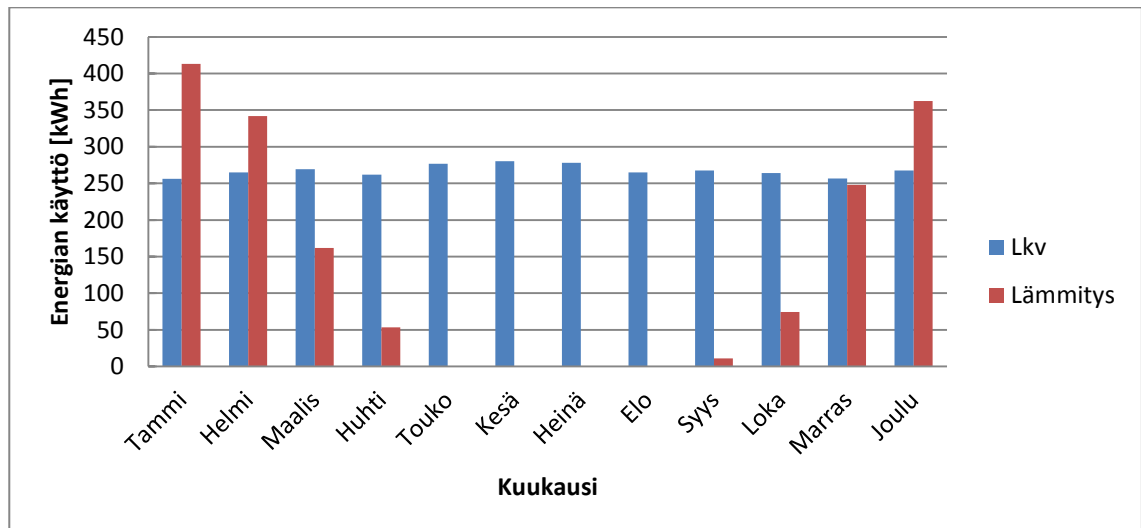
Kuva 16 Maanpinnan lämpötila vuoden aikana

Järjestelmässä aurinkokeräimessä kiertävän nesteen kuumentuessa liian korkeaksi avautuvat venttiilit, jotka yhdistävät aurinkopiirin maalämmön keruupiiriin. Venttiilit avautuvat ja aurinkokeräimen kuuma neste pääsee kiertämään maalämmön porakaivon kautta takaisin aurinkokeräimeen. Tämän tarkoituksena on jäähdyttää keräintä. Kuvassa 17 on esitetty rakennuksen lämmitysenergian kulutus vuoden aikana. Kuvaajasta nähdään, että käyttöveden lämmitysenergian kulutus on lineaarinen. Tämä johtuu siitä, että lämpimän käyttöveden viikoittainen kulutus pysyi koko vuoden samana. Lämpimän käyttöveden energiankulutus on 67 prosenttia kokonaisenergian kulutuksesta. Toukokuusta elokuuhun rakennuksen lämmittämiseen ei kulu energiaa ja lämmityksen ja käyttöveden kulmakertoimet ovat yhtä suuret.



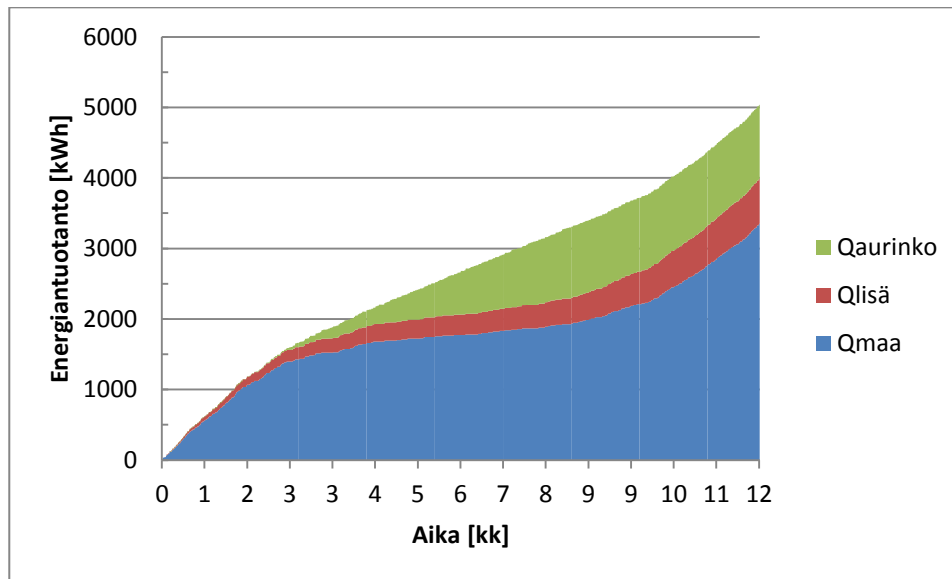
Kuva 17 Lämmityksen ja käyttöveden energian kulutus

Kuvassa 18 on esitetty lämmitysenergian käyttö kuukausittain jakautuen lämpimään käyttöveteen ja lämmitykseen. Lämpimän käyttöveden tarvitsema energia on noin 270 kWh kuukausittain. Lämmityksen tarve on suurinta tammikuussa noin 413 kWh kuukaudessa.

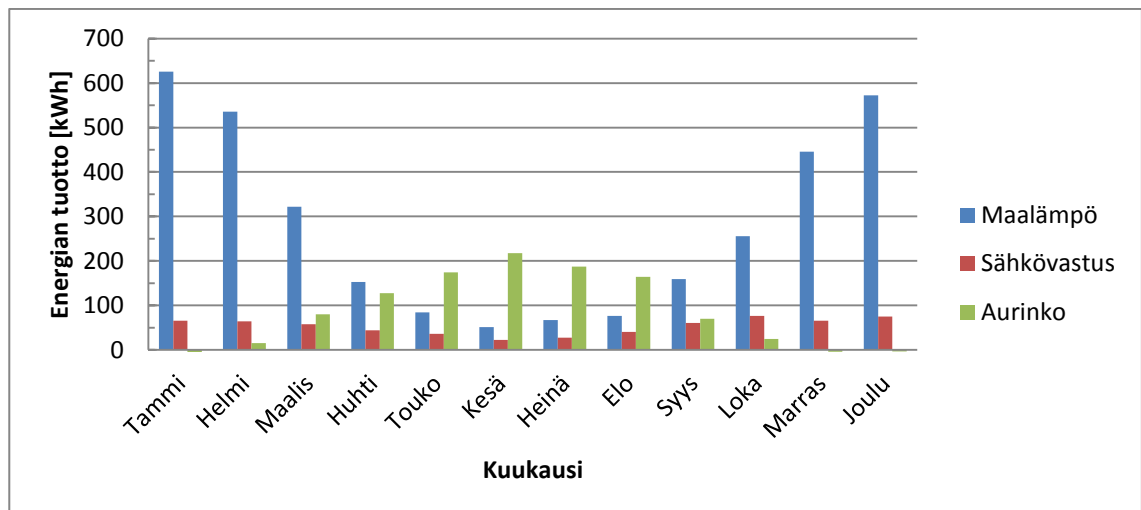


Kuva 18 Lämmitysenergian käyttö kuukausittain lämpimän käyttöveden ja lämmityksen välillä

Kuvassa 19 on esitetty lämmitysjärjestelmän energiantuotto vuoden aikana. Energiantuotannosta maalämmön osuus on 66,5 prosenttia, aurinkolämmön 20,8 prosenttia ja sähkövastuksen osuus 12,7 prosenttia. Lämmön tuotto on suurinta alku- ja loppuvuodesta. Kuvassa 20 on järjestelmien energiantuotto kuukausittain. Kuvasta 20 nähdään, että sähkövastus on tasaisesti päällä koko vuoden. Auringon tuotto on suurinta kesällä touko-elokuun välisenä aikana. Tällöin aurinko tuottaa 60 – 77 prosenttia käyttöveden tarvitsemasta lämmitysenergiasta. Loppu energia tuotetaan sähkövastuksella ja maalämpöpumpulla. Maalämpöpumpulla tuotetaan tarvittava lämmitysenergia tammi-maaliskuu sekä loka-joulukuu suurimmaksi osin. Huhtikuussa maalämmön ja auringon osuus ovat lähes samat. Syyskuussa maalämmöllä tuotetaan puolet ja toinen puoli auringolla sekä sähkövastuksella. Marras – tammikuussa auringolla ei saada tuotettua lämmitysenergiaa. Tuolloin aurinkokeräin saa negatiivisia lämmitystehon arvoja, mikä johtuu keräimessä kiertävän vesi-glykoliliuoksen sisään ja ulos virtaavan nesteen negatiivisista lämpötilaeroista. Tällöin lämpöä purkautuu varaajasta, mikä ei ole tarkoitus.



Kuva 19 Lämmitysjärjestelmän energiantuotto lämmitysmuodon mukaan



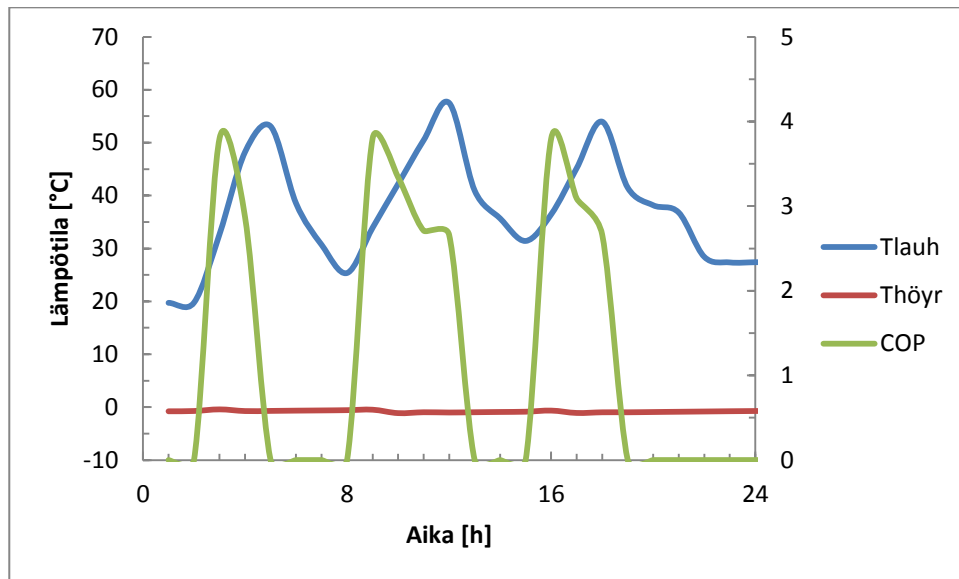
Kuva 20 Järjestelmien tuottama energia kuukausittain

Taulukossa 3 on esitetty energiantarve, -kulutus ja -tuotto lämmitykselle ja lämpimälle käyttövedelle. Simuloitavan tilan lämmitysenergian kulutus on 1665,07 kWh, mikä on vain 23 prosenttia tilan lämmitystarpeesta. Ilmaisenergioilla kuten ihmisistä, laitteista ja valaistuksesta sekä auringon passiivisesta lämmityksestä aiheutuneilla lämpökuormilla on katettu puuttuva lämmitysenergiatarve. Lämpimän käyttöveden lämmitysenergian kulutukseen kului vähemmän energiaa mitä tarve vaati ja näin ollen käyttöveden lämpötila ei pysynyt sovitussa lämpötilassaan. Järjestelmässä syntyi häviöitä 162,8 kWh, mikä on 3 prosenttia energian tuotannosta.

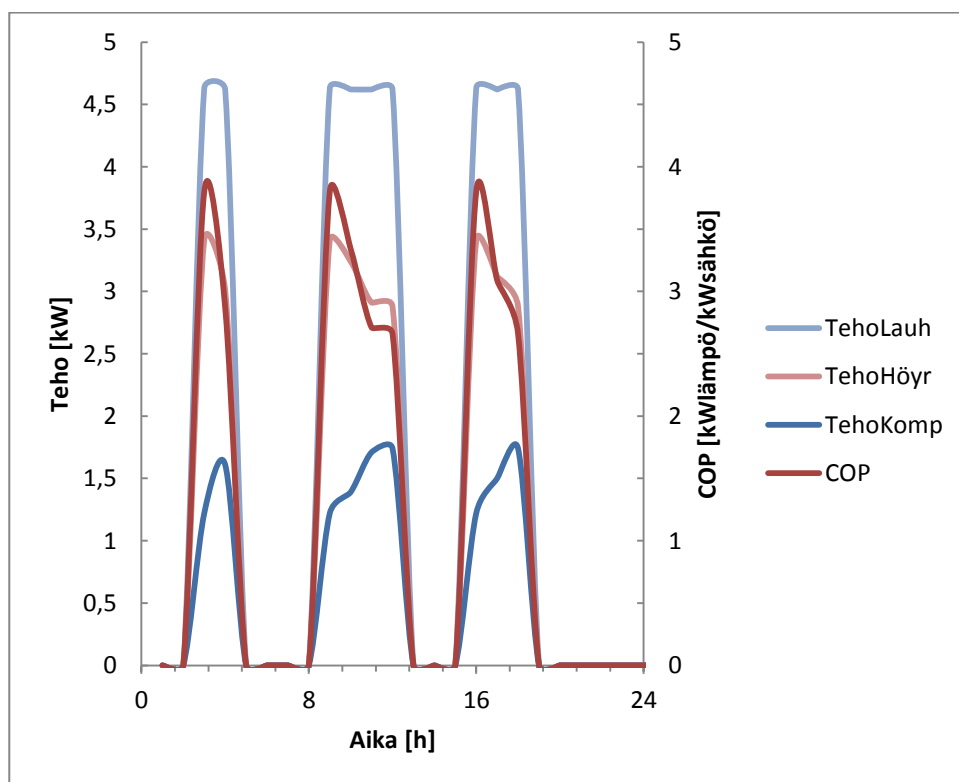
Taulukko 3 Simuloitavan tilan lämmityksen sekä koko rakennuksen lämpimän käyttöveden energiantarve, -kulutus ja -tuotto venttiilijärjestelmällä vuodessa

	Qtarve, läm [kWh]	Qtarve, lkv [kWh]	Qkulutus, läm [kWh]	Qkulutus, lkv [kWh]	Qtuotto, maa [kWh]	Qtuotto, lisä [kWh]	Qtuotto, ker [kWh]
	5812,7	3360	1665,07	3208,13	3349,44	637,5	1049,06
YHT	9172,7		4873,2		5036		

Kuvissa 21 ja 22 on esitetty maalämpöpumpun toiminta vuorokauden ajan helmikuussa. Kuvassa 21 on esitetty maalämpöpumpun lauhduttimen ja höyrystimen lämpötilat sekä maalämpöpumpun lämpökerroin. Maalämpöpumppu käynnistyy kolme kertaa vuorokauden aikana. Kokonaisuudessaan maalämpöpumppu käynnistyy kolmetoista kertaa viikon aikana helmikuussa. Höyrystimen korkea lämpötila nostaa höyrystimen tehon sekä lämpökertoimen hetkellisesti suuriksi. Höyrystimen lämpötilan laskiessa laskevat myös teho sekä lämpökerroin. Lauhduttimelta lähtevän nesteen lämpötilan noustessa lämpökertoimen arvo laskee ja tällöin tarvitaan enemmän ulkopuolista energiaa. Kompressorin käy ensin alhaisemmalla teholla ja paremmalla hyötysuhteella, mutta käynnin jatkuessa kompressorin teho kasvaa ja hyötysuhde laskee [3]. Lauhduttimelta lähtevän veden lämpötila on suhteellisen korkea, koska lämpöpumppu käynnistyy useasti. Tällöin veden lämpötila ei ehdi laskea ja lämpötila jää korkeammalle kuin vuorokauden alussa. Höyrystimen lämpötila vaihtelee vuorokauden aikana 1,4 °C astetta.



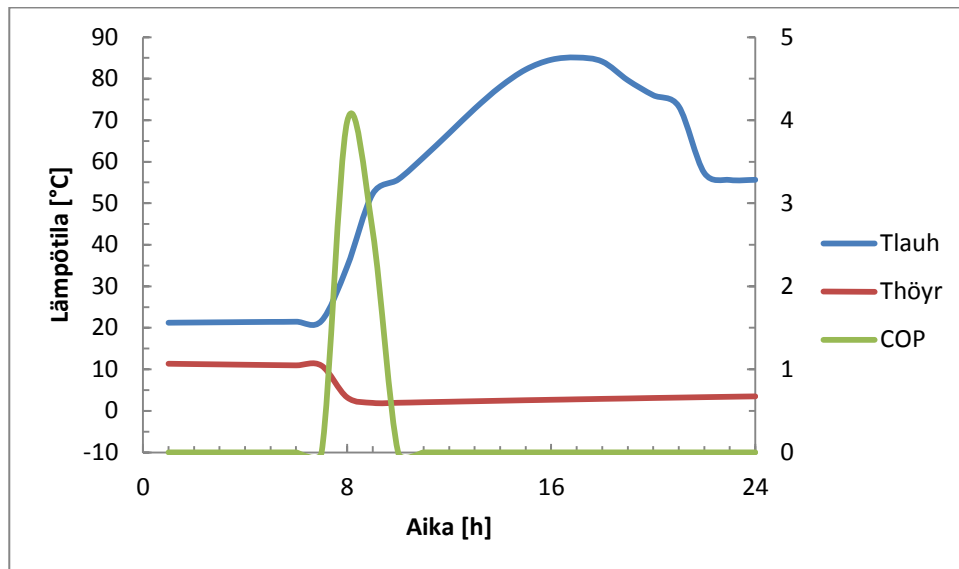
Kuva 21 Maalämpöpumpun lauhduttimen ja höyrystimen lämpötilat sekä suorituserroin vuorokauden ajalta helmikuussa venttiilijärjestelmällä



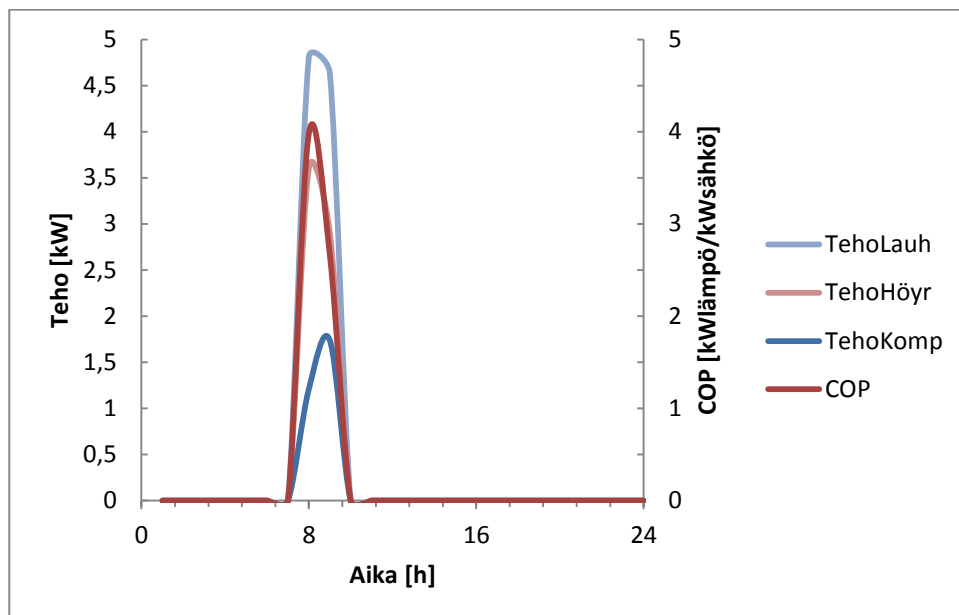
Kuva 22 Maalämpöpumpun lauhduttimen, höyrystimen ja kompressorin tehot sekä suorituserroin vuorokauden ajalta helmikuussa venttiilijärjestelmällä

Kuvissa 23 ja 24 on esitetty maalämpöpumpun toiminta vuorokauden ajan heinäkuussa. Vuorokauden ja koko viikon aikana maalämpöpumppu käynnistyy vain kerran. Kuvassa

23 on esitetty maalämpöpumpun lauhduttimen ja höyrystimen lämpötilat sekä maalämpöpumpun lämpökerroin.



Kuva 23 Maalämpöpumpun lauhduttimen ja höyrystimen lämpötilat sekä lämpökerroin vuorokauden ajalta heinäkuussa venttiilijärjestelmällä



Kuva 24 Maalämpöpumpun lauhduttimen, höyrystimen ja kompressorin tehot sekä lämpökerroin vuorokauden ajalta heinäkuussa venttiilijärjestelmällä

Maalämpöpumpun lämpötilat, tehot ja lämpökertoimet helmikuussa sekä heinäkuussa viikon ajalta on esitetty taulukossa 4 ja 5. Heinäkuussa lämpökerroin on korkeampi kuin

helmikuussa johtuen lauhduttimelle ja höyrystimelle menevän nesteen suuremmasta lämpötilaerosta. Koko vuoden lämpökerroin vaihtelee 2,66 ja 4,22 välillä.

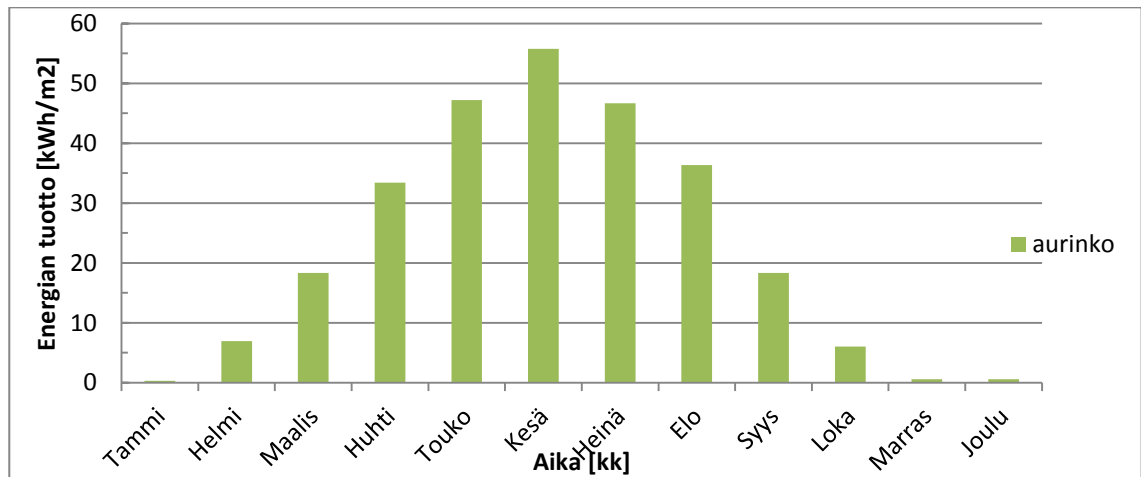
Taulukko 4 Maalämpöpumpun lauhduttimen, höyrystimen, kompressorin lämpötilojen ja tehojen sekä lämpökertoimen minimi-, maksimi- ja keskiarvot viikon ajalta helmikuussa venttiilijärjestelmällä

	T_{lauh} [°C]	T_{höyr} [°C]	Φ_{Lauh} [kW]	Φ_{Höyr} [kW]	Teho [kW]	COP
MINIMI	17,69	-1,13	4,62	2,88	1,22	2,66
MAKSIMI	59,41	0,23	4,63	3,41	1,74	3,8
KESKIARVO	33,79	0,12	4,62	3,07	1,55	3,03

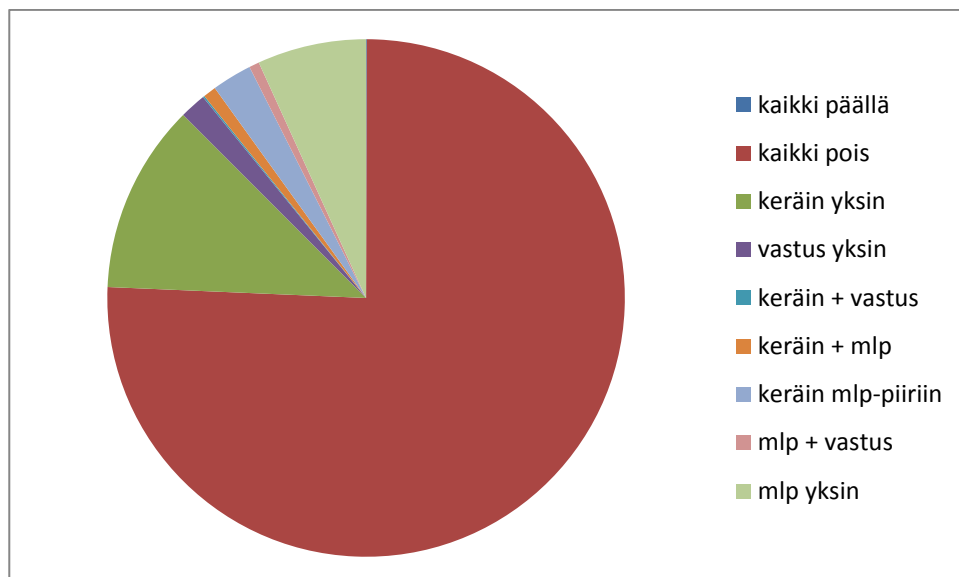
Taulukko 5 Maalämpöpumpun lauhduttimen, höyrystimen, kompressorin lämpötilojen ja tehojen sekä lämpökertoimen minimi-, maksimi- ja keskiarvot viikon ajalta helmikuussa venttiilijärjestelmässä

	T_{lauh} [°C]	T_{höyr} [°C]	Φ_{Lauh} [kW]	Φ_{Höyr} [kW]	Teho [kW]	COP
MINIMI	21,16	1,85	4,64	2,9	1,21	2,67
MAKSIMI	85,1	36,35	4,81	3,6	1,74	3,98
KESKIARVO	46,03	13,95	4,67	3,17	1,51	3,16

Kuvassa 25 on esitetty aurinkokeräimen kuukausittainen energiantuotto kilowattitunteina aurinkokeräimen neliötä kohden. Maalis-syyskuussa energiantuotto on yli 15 kWh/m². Energian tuotto on suurinta touko - heinäkuussa yli 45 kWh/m². Aurinkojärjestelmän hyötysuhde on vain 51 prosenttia. Aurinkojärjestelmän hyötysuhde tarkoittaa aurinkokeräimestä hyödyksi saadun lämmön suhdetta kerääjään osuneen auringon säteilyyn. Järjestelmän hyötysuhde laskee, koska keräin kiertää jäähdytystilanteessa maalämmön keräyspiiriin eikä tuota tällöin lämpöä varaajaan. Itse aurinkokeräimen hyötysuhde paranee, koska keräimessä kiertävän nesteen lämpötilaero kasvaa. Lämmönsiirtimen kautta kiertäessä lämpötilaero pysyy suhteellisen pienenä eikä keräimestä tuleva neste jäähydy paljonkaan varaajasta ulos tullessaan.



Kuva 25 Aurinkokeräimen kuukausittainen energiantuotanto venttiilijärjestelmässä

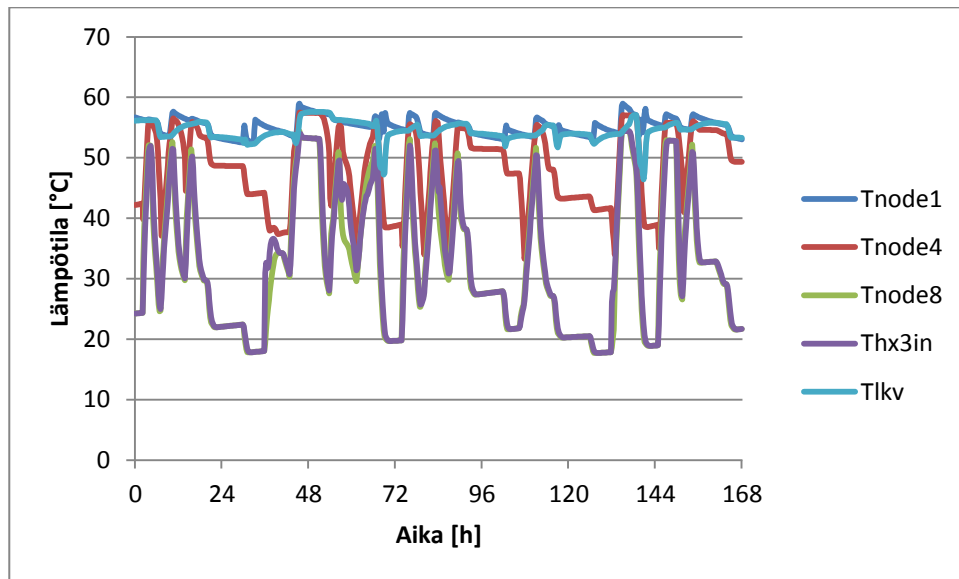


Kuva 26 Ilman venttiileitä olevan järjestelmän käyntiajat prosentteina

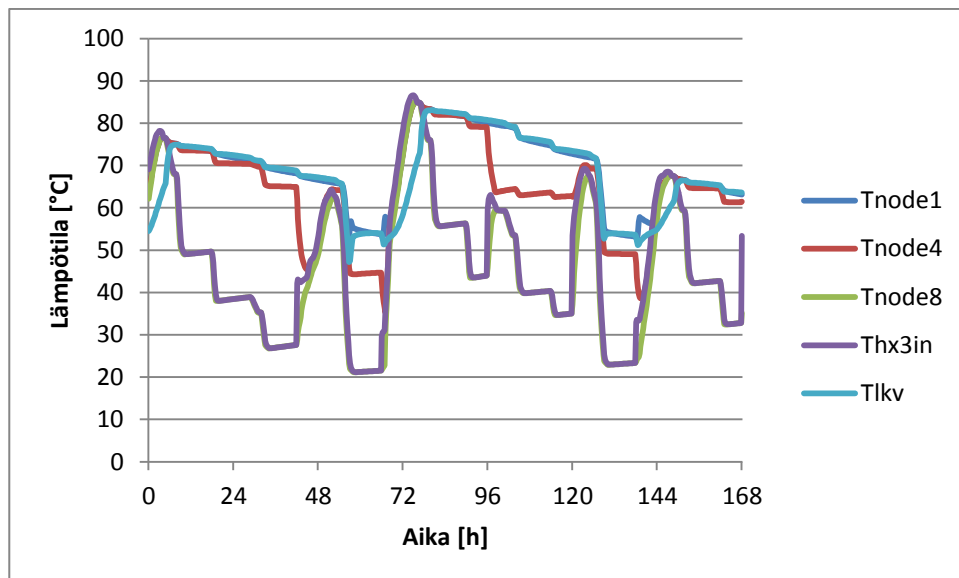
Kuvassa 26 on esitetty lämmitysjärjestelmän käyntiajat koko vuoden aikana. Koko järjestelmä on poissa päältä 76 prosenttia ajasta. Aurinkokeräin on yksinään päällä 12 prosenttia ja aurinkokeräin kiertää maalämpöpiiriin 2 prosenttia ajasta. Sähkövastus on yksinään päällä 2 prosenttia ja maalämpöpumppu yksinään 7 prosenttia ajasta. Keräin ja maalämpöpumppu ovat kaksistaan päällä yhden prosentin ajasta. Järjestelmän muut mahdolliset käyntivaihtoehdot ovat niin vähäisiä, että saavat nolla prosenttia ajasta. Järjestelmän käyntiaikoja vääristää simuloinnissa käytetty yhden huoneen lämmitys, jolloin lämmityksen tarvitsema lämmitysenergia jää pieneksi. Tämän takia järjestelmä on niin paljon poissa päältä.

Kuvassa 27 on esitetty lämminvesivaraajan ja aurinkokeräimestä lähtevän nesteen lämpötilat viikon aikana helmikuussa ja kuvassa 28 heinäkuussa. Ajanjaksot ovat 11.02. klo 00.00 – 18.02. klo 23.59 ja 02.07. klo 12.00 – 09.07. klo 11.59. Kuvasta 27 nähdään, että aurinkokierukkaan menevän nesteen (Thx3in) lämpötila seuraa varaajan alaosan (Tnode8) lämpötilaa. Helmikuussa auringon säteily on niin vähäistä, että aurinkokierukkaan menevä neste kohoaa vain muutaman kerran korkeammaksi kuin varaajan alaosan lämpötila. Varaajan yläosan (Tnode1) lämpötila on lähes sama kuin käyttöveden lämpötila (Tlkv). Näiden lämpötila on keskimäärin 55 °C astetta. Varaajan keskikohdan (Tnode4) lämpötila vaihtelee lämmityksen ja käytön mukaan. Suurilla kulutuspiikeillä keskikohdan lämpötila laskee alle 40 °C asteen. Keskikohdan lämpötila ei pysy sille asetetussa asetusarvossaan 55 °C astetta. Silloin on vaarana legionellabakteerin muodostuminen. Varaaja täytyisi kerran viikossa lämmittää yli 60 °C asteen, ettei legionellabakteeria pääsisi syntymään. Varaajan alaosan lämpötiloissa näkyy piikkimäisiä nousuja, jotka johtuvat maalämpöpumpun kytkeytymisestä päälle. Pumpun kytkeytyessä päälle lämpötilat nousevat ja pumpun mennessä pois päältä ne laskevat.

Heinäkuussa varaajan lämpötilat ovat huomattavasti korkeammat kuin helmikuussa. Koko varaajan lämpötila kohoaa 85,08 °C asteeseen. Tämä johtuu auringon voimakkaasta säteilystä, mikä nostaa aurinkokierukkaan menevän nesteen lämpötilaa. Se taas nostaa koko varaajan lämpötiloja, koska aurinkokeräin on pitkään yhtäjaksoisesti päällä. Koska kesällä ei ole muuta kulutusta kuin lämmin käyttövesi, niin varaajan kulutus on alhaisempaa ja sen lämpötilat pääsevät nousemaan korkeiksi. Aurinkokierukkaan menevän nesteen lämpötila vaihtelee paljon päivän ajankohdasta riippuen. Varaajan yläosan ja lämpimän käyttöveden lämpötilat seuraavat lähes toisiaan. Lämpötilat ovat suurimman osan ajasta yli 60 °C astetta. Keskikohdan lämpötila seuraa sekä yläosan lämpötilaa että alaosan lämpötilaa. Keskikohdan lämpötilan suuremmat laskut johtuvat kulutuksen kasvamisesta. Tällöin simuloinnissa on nostettu kulutus normaalista 48 litrasta tunnissa 120 litraan tunnissa.



Kuva 27 Varaajan ja aurinkokeräimestä lähtevän nesteen lämpötilat helmikuussa



Kuva 28 Varaajan ja aurinkokeräimestä lähtevän nesteen lämpötilat heinäkuussa

Taulukossa 6 ja 7 on esitetty varaajan minimi-, maksimi- ja keskiarvolämpötilat viikon ajalta helmikuussa ja heinäkuussa.

Taulukko 6 Varaajan lämpötilat helmikuussa viikon ajalla

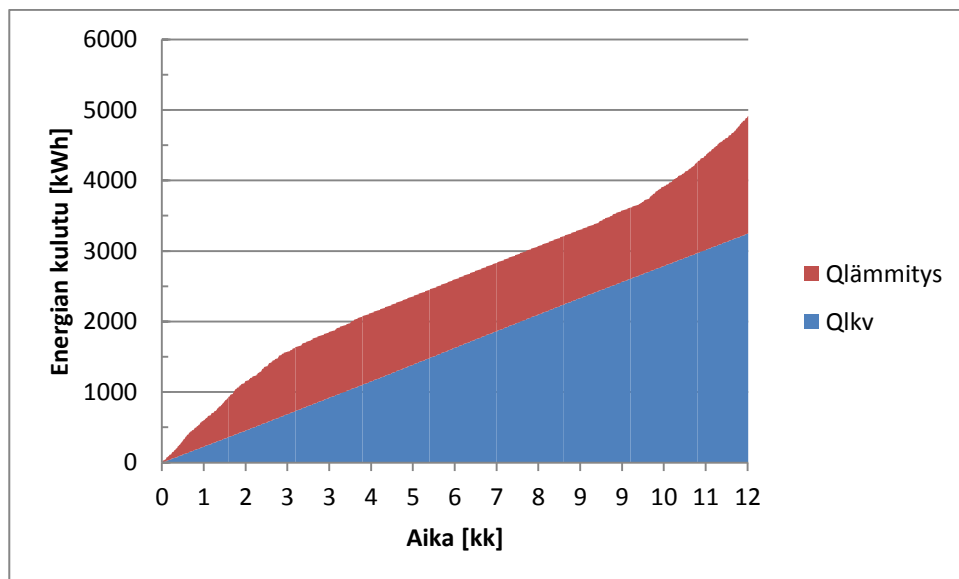
	Tnode1	Tnode4	Tnode8	Thx3in	Tlkv
MINIMI	52,51	33,29	17,69	17,71	46,41
MAKSIMI	58,97	57,48	54,49	54,46	57,61
KESKIARVO	55,22	48,18	32,73	33,14	54,50

Taulukko 7 Varaajan lämpötilat heinäkuussa viikon ajalla

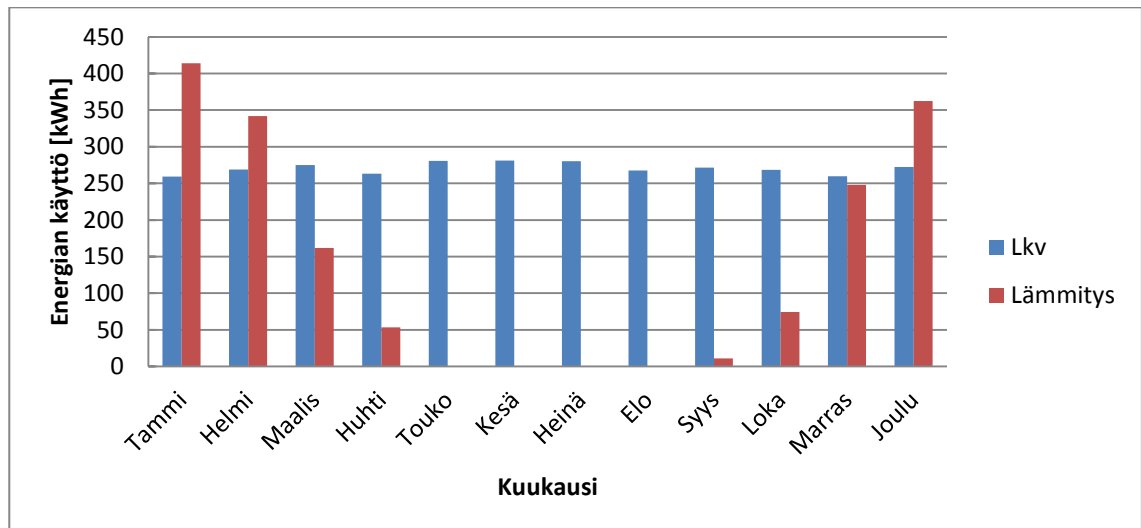
	Tnode1	Tnode4	Tnode8	Thx3in	Tlkv
MINIMI	52,52	35,29	21,16	21,17	47,17
MAKSIMI	85,08	85,08	85,08	86,57	83,12
KESKIVARVO	69,54	64,77	45,99	47,64	68,20

5.2 Yhdistetyn järjestelmä ilman keräyspiirien venttiileitä

Järjestelmässä maalämpö ja aurinkolämpö toimivat omissa piireissään. Kuvassa 29 on esitetty rakennuksen lämmitysenergian kulutus vuoden aikana. Lämmitysenergian kulutus on lähes sama kuin aurinkokeräimen kierteessä maalämpöpiiriin. Eroa on vain 2 kWh vuoden aikana. Käyttöveden lämmittämisessä ero on myös pieni 40 kWh. Kuvassa 30 on lämmitysenergian kulutuksen kuukausittainen jakauma lämmityksen ja käyttöveden kesken. Kuvasta 30 nähdään käyttöveden tasainen jakauma. Lämmityksen tarve on suurin marras – helmikuu välisenä aikana. Kesällä lämmitystä ei kulu lainkaan.

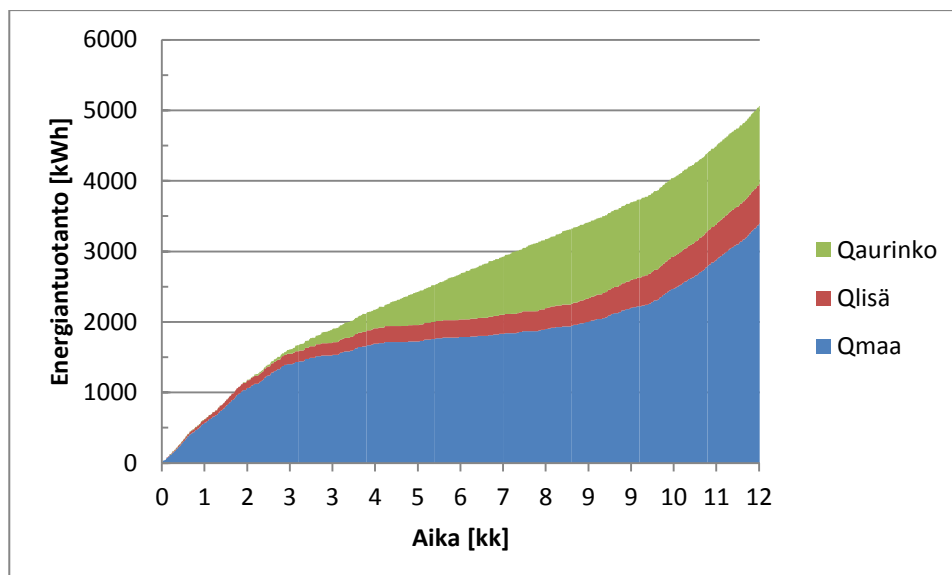


Kuva 29 Lämmityksen ja käyttöveden energian kulutus

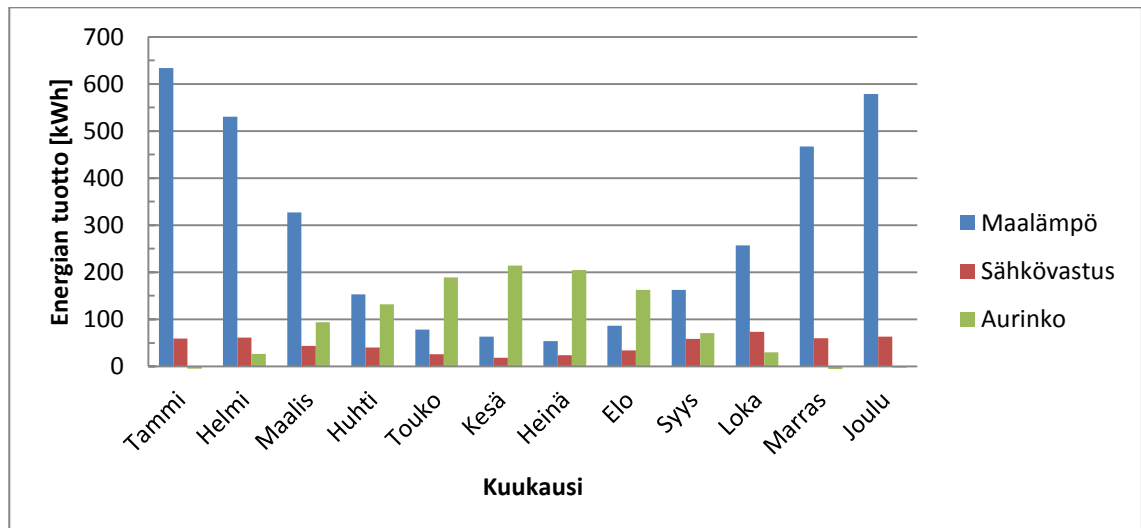


Kuva 30 Lämmitysenergian jakautuminen lämmitykseen ja käyttöveteen

Kuvassa 31 on esitetty lämmitysjärjestelmän energiantuotto vuoden aikana. Maalämmön osuus on 67 prosenttia, aurinkolämmön 22 prosenttia ja sähkövastuksen 11 prosenttia energiantuotosta. Aurinkolämpö tuottaa kesällä suurimman osan tuotetusta lämmöstä. Kuvassa 32 on eri järjestelmien kuukausittainen energian tuotto vuoden aikana. Kuvista 31 ja 32 voidaan todeta, että auringolla voidaan lämmittää kesällä 60 – 76 prosenttia tarvittavasta lämpimästä käyttövedestä. Loppu hoidetaan sähkövastuksella ja maalämpöpumpulla.



Kuva 31 Lämmitysjärjestelmän energiantuotto lämmitysmuodon mukaan



Kuva 32 Energian tuotto järjestelmittäin vuoden aikana aurinko-maalämpöpiirissä

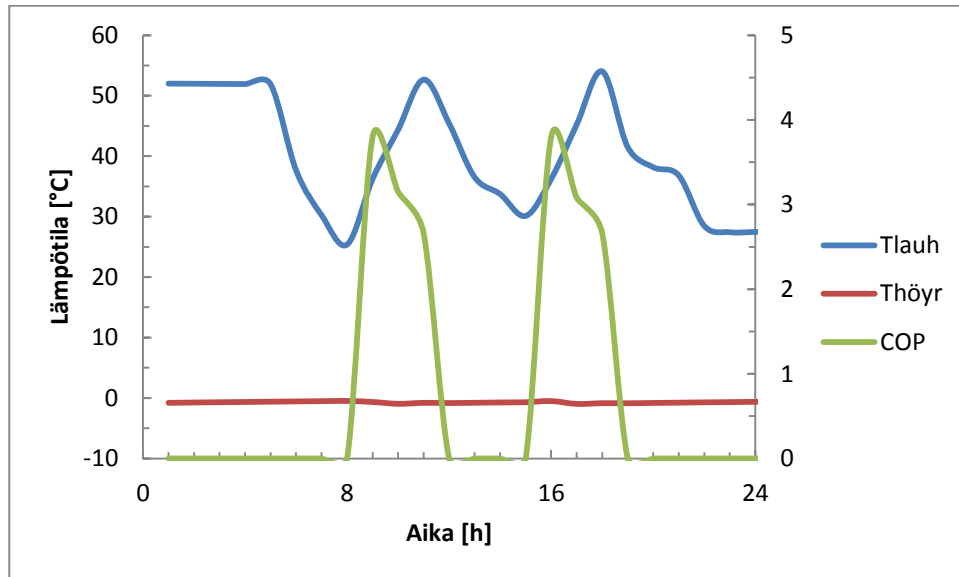
Taulukossa 8 on esitetty energiantarve, -kulutus ja -tuotto lämmitykselle sekä lämpimälle käyttövedelle. Häviöitä järjestelmässä syntyy 147,63 kWh, mikä on noin kolme prosenttia energian tuotannosta. Lämmitysenergian määrät ovat lähes samat molemmilla järjestelmillä. Aurinko-maalämpöpiiri tuottaa 50 kWh enemmän maalämpöä, 60 kWh enemmän aurinkolämpöä ja 75 kWh vähemmän sähkövastuksella kuin venttiili-järjestelmä.

Taulukko 8 Simuloitavan tilan lämmityksen sekä koko rakennuksen lämpimän käyttöveden energiantarve, -kulutus ja -tuotto järjestelmällä vuodessa

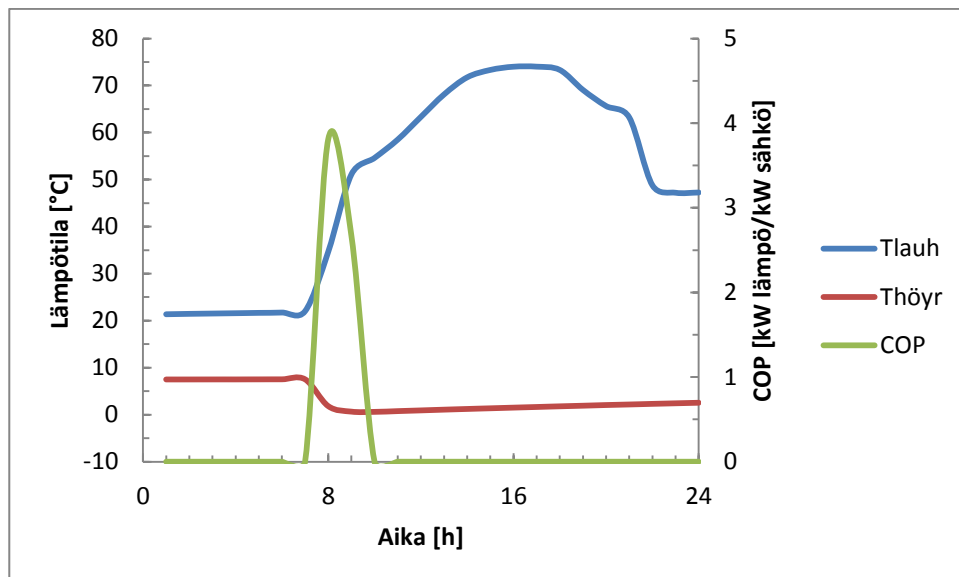
	Qtarve, läm [kWh]	Qtarve, lkv [kWh]	Qkulutus, läm [kWh]	Qkulutus, lkv [kWh]	Qtuotto, maa [kWh]	Qtuotto, lisä [kWh]	Qtuotto, ker [kWh]
	5812,52	3360	1666,27	3247,69	3392,35	562,5	1106,74
YHT	9172,52		4913,96		5061,59		

Kuvassa 33 ja 34 on lauhduttimen ja höyrystimen lämpötilat sekä lämpöpumpun lämpöeroin vuorokauden ajalta helmikuussa sekä heinäkuussa. Maalämpöpumppu käynnistyy helmikuussa vuorokauden aikana kaksi kertaa. Koko viikon aikana maalämpöpumppu käynnistyy kolmetoista kertaa samoin kuin venttiilijärjestelmä. Lauhduttimen lämpötila on alussa korkea johtuen edellisen vuorokauden aikana olleesta pidemmästä lämmitysjaksosta. Lämpötila ei ole ehtinyt laskea, koska lämmitysjaksoja on useammin. Lauhduttimen lämpötila on lähes muuttumaton. Heinäkuussa lämpöpumppu käynnistyy

kerran koko viikon aikana. Lauhduttimen lämpötila on lähellä ulkoilman lämpötilaa, mutta nousee nopeasti korkealle. Höyrystimen lämpötila laskee lämpöpumpun käynnistyessä, jonka jälkeen se taas nousee.

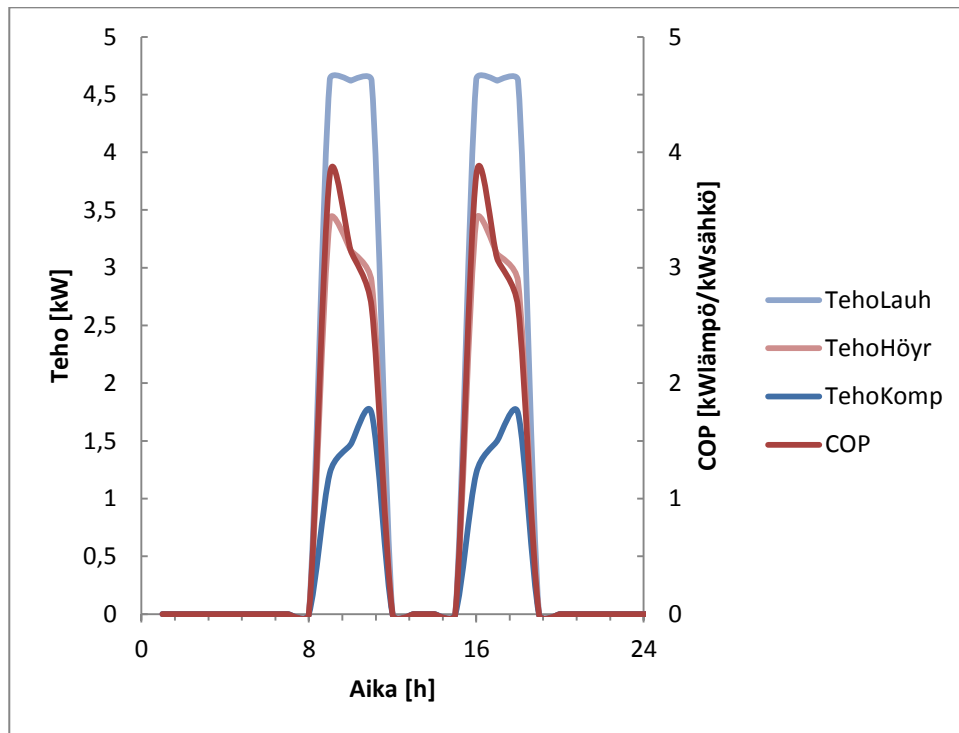


Kuva 33 Maalämpöpumpun lauhduttimen ja höyrystimen lämpötilat sekä lämpökerroin helmikuussa vuorokauden aikana aurinko-maalämpöjärjestelmällä

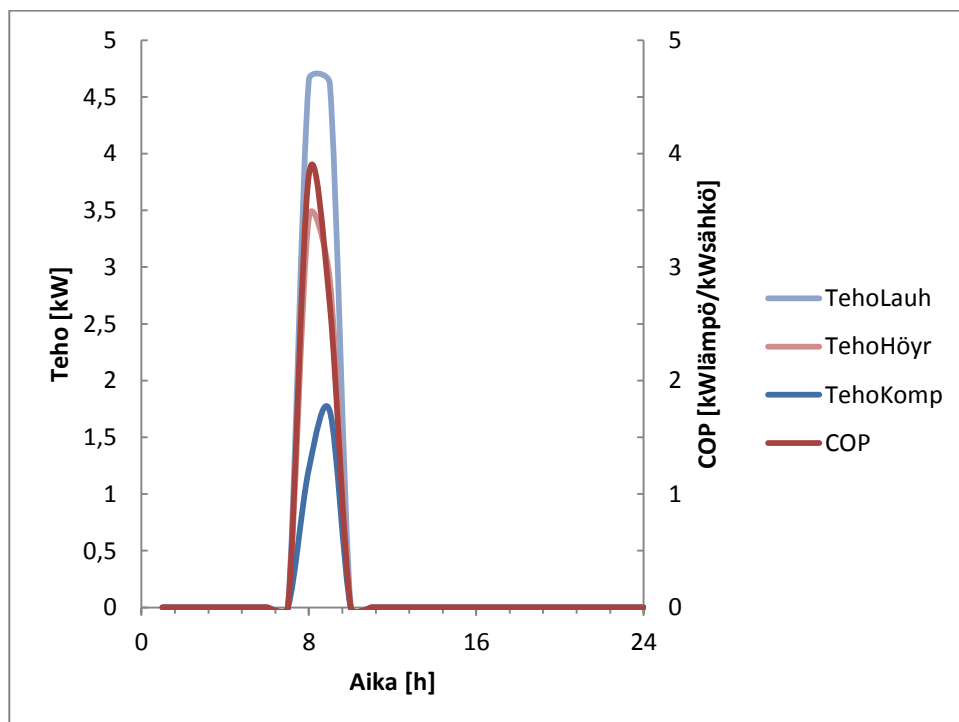


Kuva 34 Maalämpöpumpun lauhduttimen ja höyrystimen lämpötilat sekä lämpökerroin heinäkuussa vuorokauden aikana aurinko-maalämpöjärjestelmällä

Kuvassa 35 ja 36 on lauhduttimen, höyrystimen ja kompressorin tehot sekä lämpökerroin vuorokauden ajalta helmikuussa ja heinäkuussa.



Kuva 35 Maalämpöpumpun lauhduttimen, höyrystimen ja kompressorin tehot sekä lämpökerroin vuorokauden ajalta helmikuussa aurinko-maalämpöjärjestelmällä



Kuva 36 Maalämpöpumpun lauhduttimen, höyrystimen ja kompressorin tehot sekä lämpökerroin vuorokauden ajalta heinäkuussa aurinko-maalämpöjärjestelmällä

Taulukossa 9 ja 10 on esitetty maalämpöpumpun höyrystimen ja lauhduttimen lämpötilat sekä tehot ja lämpöpumpun lämpökertoimet helmi- ja heinäkuussa viikon ajalta. Koko vuoden lämpökerroin 2,66 – 3,84. Aurinko-maalämpöpiirin koko vuoden lämpökerroimen maksimiarvo on yhdeksän prosenttia pienempi kuin venttiili-piirin.

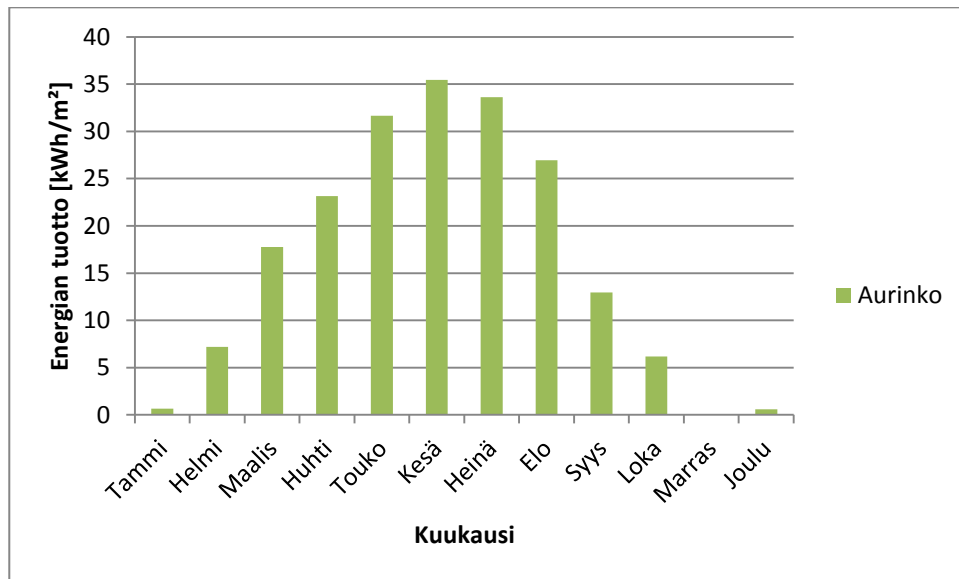
Taulukko 9 Maalämpöpumpun lämpötilat, tehot sekä lämpökerroin viikon ajalta helmikuussa aurinko-maalämpöjärjestelmällä

	T_{lauh} [°C]	T_{höyr} [°C]	Φ_{lauh} [kW]	Φ_{höyr} [kW]	Teho [kW]	COP
MINIMI	17,37	-1,14	4,64	2,9	1,21	2,67
MAKSIMI	60,05	0,2	4,63	3,41	1,74	3,8
KESKIARVO	35,03	0,10	4,62	3,07	1,55	3,04

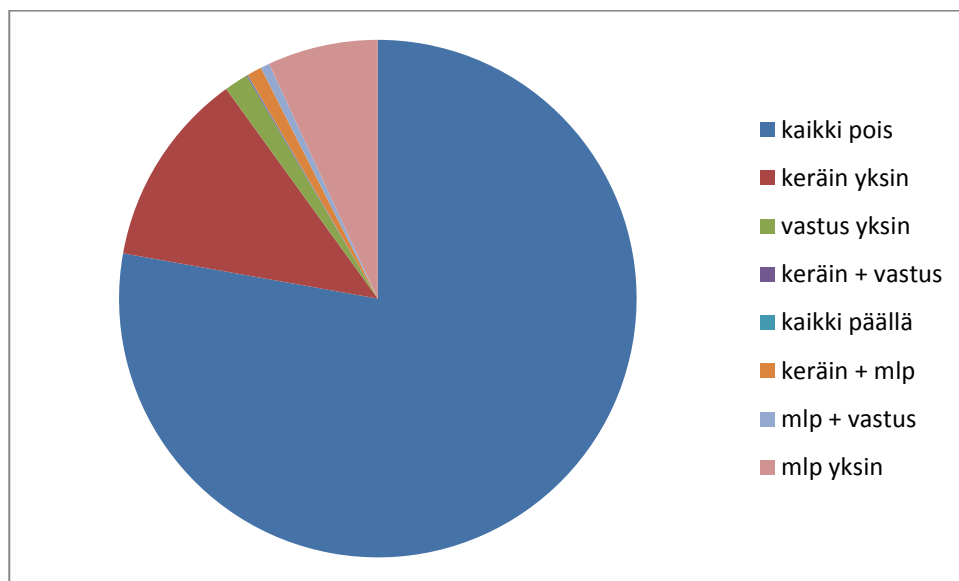
Taulukko 10 Maalämpöpumpun lämpötilat, tehot sekä lämpökerroin viikon ajalta heinäkuussa aurinko-maalämpöjärjestelmällä

	T_{lauh} [°C]	T_{höyr} [°C]	Φ_{lauh} [kW]	Φ_{höyr} [kW]	Teho [kW]	COP
MINIMI	21,,25	0,54	4,64	2,9	1,21	2,67
MAKSIMI	78,78	7,53	4,65	3,43	1,74	3,81
KESKIARVO	48,09	5,70	4,63	3,09	1,54	3,07

Kuvassa 37 on esitetty aurinkokeräimen energiantuotto kilowattitunteina neliötä kohden. Maalis-syyskuussa energiantuotto on yli 10 kWh/m². Suurinta on touko-heinäkuussa yli 30 kWh/m². Tämä on kymmenen kilowattituntia vähemmän neliötä kohden kuin venttiili-järjestelmällä. Aurinkopiirin hyötysuhde on 67,84 prosenttia, mikä on yli 27 % suurempi kuin venttiili-järjestelmällä. Hyötysuhde kuvaa varsinaisesti hyötykäyttöön saadun energian ja kerääjällä saadun kokonaisenergian suhdetta.



Kuva 37 Aurinkokeräimen kuukausittainen energiantuotanto aurinko-maalämpöjärjestelmässä

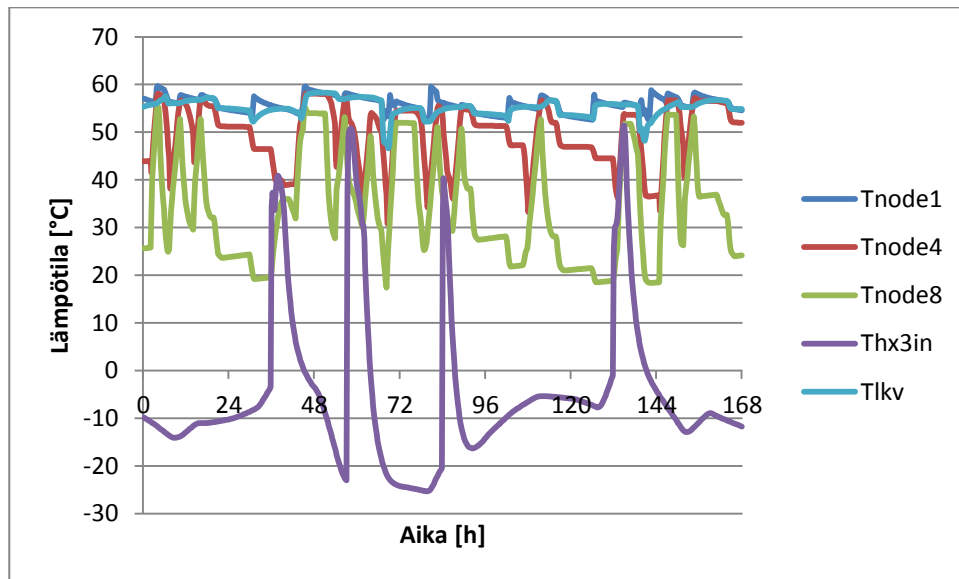


Kuva 38 Ilman venttiileitä olevan järjestelmän käyntiajat prosentteina

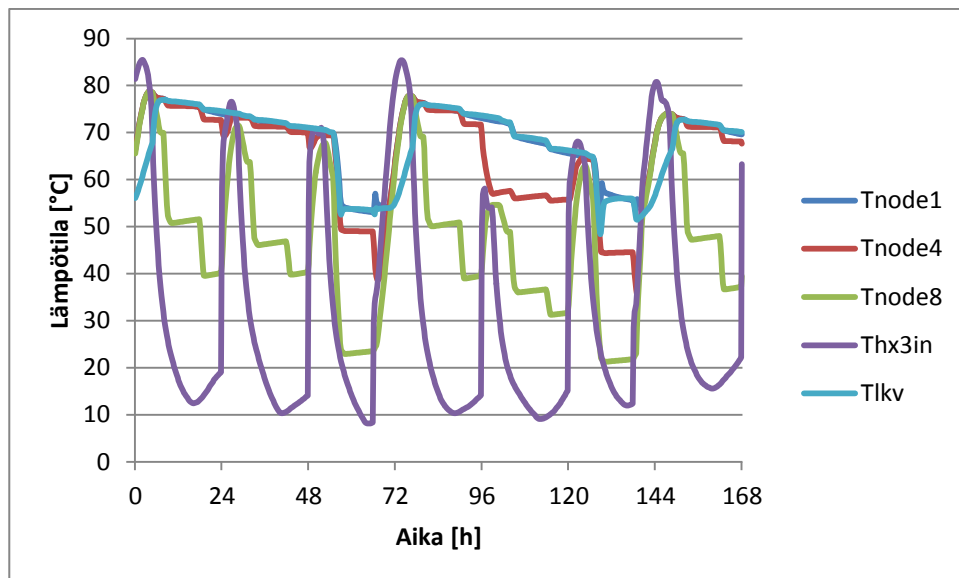
Kuvassa 38 on esitetty järjestelmän käyntiajat prosentteina vuoden aikana. Koko järjestelmä on poissa päältä 78 prosenttia ajasta. Keräin on yksinään päällä 12 prosenttia ja maalämpöpumppu seitsemän prosenttia ajasta. Sähkövastus on yksinään päällä yhden prosentin ajasta. Samoin maalämpö, vastus tai keräin, vastus ovat yhdessä päällä yhden prosentin ajasta yhdessä päällä. Muut käyntivaihtoehdot ovat nolla prosenttia ajasta päällä.

Kuvassa 39 on esitetty lämminvesivaraajan ja aurinkokeräimestä lähtevän nesteen lämpötilat helmikuussa ja kuvassa 40 heinäkuussa viikon aikana. Helmikuun tuloksista nähdään, että auringon säteily ei ole niin voimakasta että se riittäisi nostamaan keräimestä ulostulevan (Thx3in) nesteen lämpötilan varaajan alaosan (Tnode8) lämpötilaa korkeammaksi. Tämä tapahtuu neljä kertaa hetkellisesti. Keräimestä tulevan nesteen lämpötila pääsee laskemaan lähelle jäätyispistettä, koska auringon säteily on niin vähäistä eikä aurinkojärjestelmän pumppu mene tämän takia päälle. Varaajan alaosan lämpötila heilahtelee paljon. Samoin keskikohdan lämpötila, mutta heilahtelut eivät ole niin jyrkkiä kuin alaosan lämpötiloilla. Heilahtelut johtuvat maalämpöpumpun päälle – pois kytkeytymisestä. Pidempi aikaiset laskut johtuvat käyttöveden suuremmasta kulu-
tuksesta. Käyttöveden lämpötila seuraa varaajan yläosaa kuten venttiili-järjestelmässä.

Koko varaajan lämpötilat ovat heinäkuussa korkeammat kuin helmikuussa. Kuvasta 40 nähdään heinäkuussa tapahtuvat aurinkokeräimestä ulostulevan nesteen lämpötilojen vaihtelut. Keräimen lämpötilojen vaihtelut johtuvat vuorokausivaihtelusta. Kun keräin on kauan aikaa päällä ja keräimestä tulevan nesteen lämpötila nousee korkeaksi, nostaa se koko varaajan lämpötiloja, erityisesti varaajan alaosan lämpötilaa. Varaajan alaosan lämpötila seuraa keräimestä tulevan nesteen lämpötilaa jonkin verran viiveellä. Koska varaajan alaosan lämpötila nousee korkeaksi, tapahtuu välillä niin, ettei keräin mene päälle vaikka säteilyn tuomaa energiaa riittäisi. Varaajan alaosan lämpötila säilyy korkeana ja keräimestä tulevan nesteen lämpötila ei nouse tällöin riittävästi. Käyttöveden lämpötilan laskut johtuvat samalla tavoin kulutuksen kasvusta kuten muissakin tapauksissa.



Kuva 39 Varaajan ja aurinkokeräimestä lähtevän nesteen lämpötilat helmikuussa



Kuva 40 Varaajan ja aurinkokeräimestä ulostulevan nesteen lämpötilat heinäkuussa

Taulukossa 11 ja 12 on esitetty varaajan yläosan, keskikohdan, alaosan, lämpimän käyttöveden sekä aurinkokierukkaan menevän nesteen lämpötila viikon ajalta helmi- ja heinäkuussa. Taulukosta nähdään, että heinäkuussa koko varaajan lämpötila kohoaa yli 78 °C asteen. Tätä ennen keräimestä tuleva neste on kohonnut yli 85 °C asteen yläpuolelle. Tämä nostaa varaajan lämpötilaa, koska muuta kulutusta ei ole kuin käyttövesi.

Taulukko 11 Varaajan lämpötilat helmikuussa

	Tnode1	Tnode4	Tnode8	Thx3in	Tlkv
MIN	52,51	30,76	17,37	-25,34	46,59
MAX	59,67	58,09	55,2	51,4	58,29
AVE	55,93	49,44	34,02	-5,04	55,19

Taulukko 12 Varaajan lämpötilat heinäkuussa

	Tnode1	Tnode4	Tnode8	Thx3in	Tlkv
MIN	52,87	35,24	21,25	8,11	48,36
MAX	78,76	78,76	78,76	85,45	77
AVE	69,02	65,29	48,05	32,62	67,74

5.3 Yhdistettyjen järjestelmien vertailu aiempiin simulointimalleihin

Heikkilän [3] tekemän vertailujärjestelmän lämmityksen sekä lämpimän käyttöveden energiantarve, -kulutus ja – tuotto on esitetty taulukossa 13. Järjestelmässä syntyy häviöitä 149,75 kWh, mikä on kolme prosenttia järjestelmän energiantuotannosta. Maalämmöllä tuotetaan 75 prosenttia tuotetusta energiasta ja sähkövastuksella 25 prosenttia. Kun tuloksia verrataan aurinkojärjestelmiin, niin huomataan niiden olevan samaa luokkaa. Aurinkolämmöllä pystyttiin tuottamaan noin 22 prosenttia, maalämmöllä noin 67 prosenttia ja sähkövastuksella 11 prosenttia. Aurinkolämpö kattaa lähes vertailujärjestelmän sähkövastuksen osuuden. Lämmitysenergian tarve on kaikissa simuloinneissa lähestulkoon sama noin 9175 kWh. Lämmitysenergian kulutus on järjestelmillä lähes samat. Niiden erot eivät ole kuin yhden tai kahden prosentin luokkaa. Käyttöveden lämmitysenergian kulutus on 100 kWh vähemmän aurinkojärjestelmillä. Järjestelmien erot syntyvät energian tuotossa. Aurinkojärjestelmät tuottavat maalämmöllä 400 - 450 kWh vähemmän lämpöä, mikä on noin 13 prosenttia vähemmän kuin vertailujärjestelmällä. Sähkövastuksen tuottama lämpöenergian määrä on suurin ero aurinkojärjestelmiä verrattuna referenssijärjestelmään. Aurinkojärjestelmät tuottavat yli 50 prosenttia vähemmän lämpöenergiaa sähkövastuksella kuin referenssijärjestelmä.

Taulukko 13 Vertailujärjestelmän simuloitavan tilan lämmityksen sekä koko rakennuksen lämpimän käyttöveden energiantarve, -kulutus ja -tuotto vuodessa

	Qtarve, läm [kWh]	Qtarve, lkv [kWh]	Qkulutus, läm [kWh]	Qkulutus, lkv [kWh]	Qtuotto, maa [kWh]	Qtuotto, lisä [kWh]
	5814,28	3360	1668,58	3313,93	3873,76	1258,5
YHT	9174,28		4982,51		5132,26	

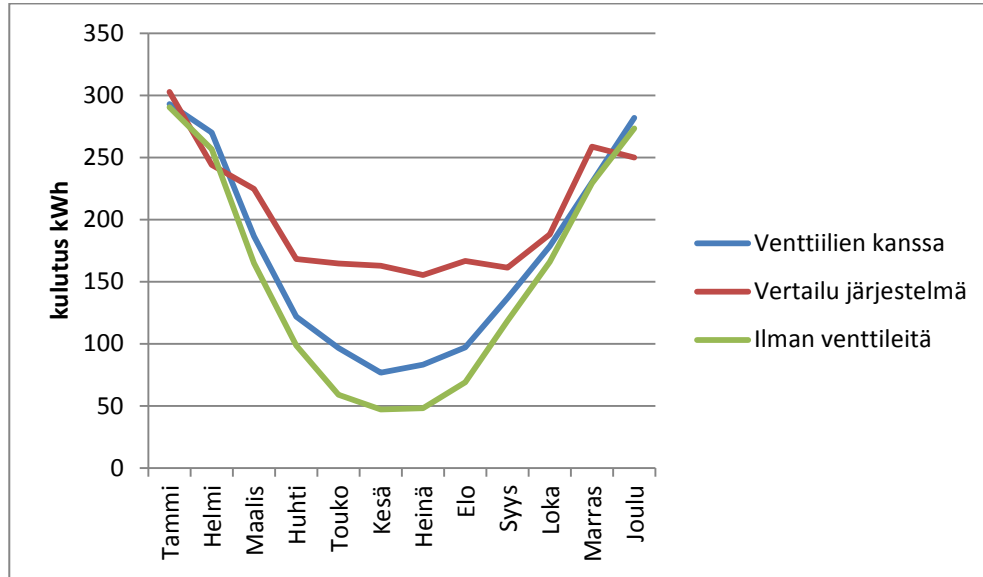
Järjestelmä on poissa päältä 90,45 prosenttia ajasta. Sähkövastus on yksinään päällä 2,66 prosenttia ajasta. Maalämpö on yksinään päällä 4,76 prosenttia ja sähkövastuksen kanssa 2,13 prosenttia ajasta. Suurin ero aurinko-maalämpöjärjestelmiin verrattuna on järjestelmän poissa päältä-olo ajassa. Vertailujärjestelmä on poissa päältä 15 prosenttia enemmän ajasta kuin aurinko-maalämpöjärjestä. Tämä kuitenkin selittyy sillä, että aurinkokeräin on noin 15 prosenttia ajasta yksinään päällä.

Maalämpöpumpun suorituskerroin vaihtelee vuoden aikana 2,82 – 4,82 välillä ja sen keskiarvo on 3,58. Vertailujärjestelmän huippusuorituskerroin on 18 – 20 prosenttia korkeampi kuin aurinko-maalämpöjärjestelmillä.

Venttiilijärjestelmän maalämpöpumpun lauhduttimen keskiarvon tehot ovat 2 kW pienemmät kuin vertailujärjestelmällä. Tämä on 27 prosenttia pienempi kuin vertailujärjestelmällä. Lauhduttimen teho ei järjestelmällä juuri muutu, kun vertailujärjestelmän teho vaihtelee enemmän. Höyrystimen tehon ja lämpökertoimen vaihtelut ovat vertailujärjestelmällä myös suuremmat. Höyrystimen teho on 31 prosenttia suurempi ja lämpökertoimen 11 prosenttia suurempi. Lämpöpumpun teho on vertailujärjestelmällä 18 prosenttia suurempi kuin venttiilijärjestelmällä.

Kuvassa 41 on järjestelmien energian kulutus vuoden aikana. Energian kulutukseen on laskettu maalämpöpumpun ja sen kiertopumppujen, lattialämmityksen pumpun, aurinkokeräimen pumpun ja lämminvesivaraajan sähkövastuksen energian kulutukset. Vertailujärjestelmän kokonaisenergian kulutus on 2447,58 kWh. Aurinkopiirin kierto maalämpöpiiriin-järjestelmän kulutus on 2178,73 kWh ja aurinko- maalämpöpiiri-järjestelmän kulutus on 1893,96 kWh. Aurinko-maalämpöpiirijärjestelmä kuluttaa 553,62 kWh vähemmän energiaa vuoden aikana, mikä on 23 prosenttia vähemmän kuin

vertailujärjestelmän energian kulutus. Aurinkopiirin kierto maalämpöpiiriin- järjestelmä kuluttaa 268,85 kWh (11 %) vähemmän kuin vertailujärjestelmä.



Kuva 41 Järjestelmien energian kulutus vuoden aikana

5.4 Järjestelmien SPF-luku [14]

Tärkein toimintakykyä kuvaava arvo on kausittaista suorituskkyä kuvaava kerroin, SPF-luku, joka lasketaan kaavalla

$$SPF_{SHP+} = \frac{\int (\dot{Q}_{DHW} + \dot{Q}_{SH}) \cdot dt}{\int \dot{P}_{el,T} \cdot dt} = \frac{Q_{DHW} + Q_{SH}}{P_{el,T}} \quad (1)$$

missä dt on aika-askel [s], \dot{Q} on lämpökuorma [W], $\dot{P}_{el,T}$ on kokonaissähkön kulutus [W], Q on vuosittainen lämpökuorma [W] ja $P_{el,T}$ vuosittainen kokonaissähkön kulutus [W]. SHP tarkoittaa aurinko- ja lämpöpumppua, DHW lämmintä käyttövettä ja SH lämmitystä. Kokonaissähkön kulutus lasketaan kaavalla

$$\dot{P}_{el,T} = \dot{P}_{el,PU} + \dot{P}_{el,HP} + \dot{P}_{el,CU} + \dot{P}_{el,aux} , \quad (2)$$

missä pu tarkoittaa kiertopumppuja, hp lämpöpumppua, cu säätöyksikkö ja aux sähkövastusta. Säätöyksikön sähkön kulutukseksi voidaan olettaa 3 W. Kaavassa 1 SHP+ symboli + ottaa huomioon kiertopumpun sähkön kulutuksen. $\dot{P}_{el,T}$ tarkoittaa kaikkia kiertopumppuja. Lämpöpumpun SPF-luku lasketaan kaavalla

$$SPF_{HP} = \frac{\int \dot{Q}_{con} \cdot dt}{\int \dot{P}_{el, hp} \cdot dt}. \quad (3)$$

missä \dot{Q}_{con} tarkoittaa lämpöpumpun lauhduttimelle toimitetun lämmön määrää. Referenssikohteeseen (ref) verrattaessa SPF-luvun muutosta tutkittavaan kohteeseen. (SHP+) voidaan tarkastella kaavalla

$$\Delta SPF_{SHP+} = \frac{SPF_{SHP+} - SPF_{ref}}{SPF_{ref}}. \quad (4)$$

Järjestelmien väliset aurinkosäästöt

$$f_{save, el} = 1 - \frac{(P_{el, T})_{SHP+}}{(P_{el, T})_{ref}}. \quad (5)$$

Täydellinen energiansäästö lasketaan kaavalla

$$P_{save, el} = (P_{el, T})_{ref} - (P_{el, T})_{SHP+}. \quad (6)$$

Vertailujärjestelmän kokonaissähkön kulutus $(P_{el, T})_{ref} = 2430,12$ kWh. Lämpimän käyttöveden ja lämmityksen tarvitsema energiamäärä on $(Q_{DH} + Q_{SH}) = 4982,51$ kWh. Järjestelmän SPF-luvuksi näin ollen saadaan kaavalla 1

$$SPF_{SHP+} = \frac{Q_{DHW} + Q_{SH}}{P_{el, T}} = \frac{4982,51}{2430,12} = 2,05.$$

Aurinko-maalämpöjärjestelmän (ilman kiertoa maalämpöpiirin) arvot ovat kokonaissähkön kulutus $(P_{el, T})_{SHP} = 1804,16$ kWh. Lämpimän käyttöveden ja lämmityksen tarvitsema energiamäärä on $(Q_{DH} + Q_{SH}) = 4913,96$ kWh. Järjestelmän SPF-luvuksi näin ollen saadaan

$$SPF_{SHP+} = \frac{Q_{DHW} + Q_{SH}}{P_{el, T}} = \frac{4913,6}{180,16} = 2,73.$$

Aurinko-maalämpöjärjestelmän (kierto maalämpöpiirin) arvot ovat kokonaissähkön kulutus $(P_{el, T})_{SHP} = 1880,66$ kWh. Lämpimän käyttöveden ja lämmityksen tarvitsema energiamäärä on $(Q_{DH} + Q_{SH}) = 4873,2$ kWh. Järjestelmän SPF-luvuksi näin ollen saadaan

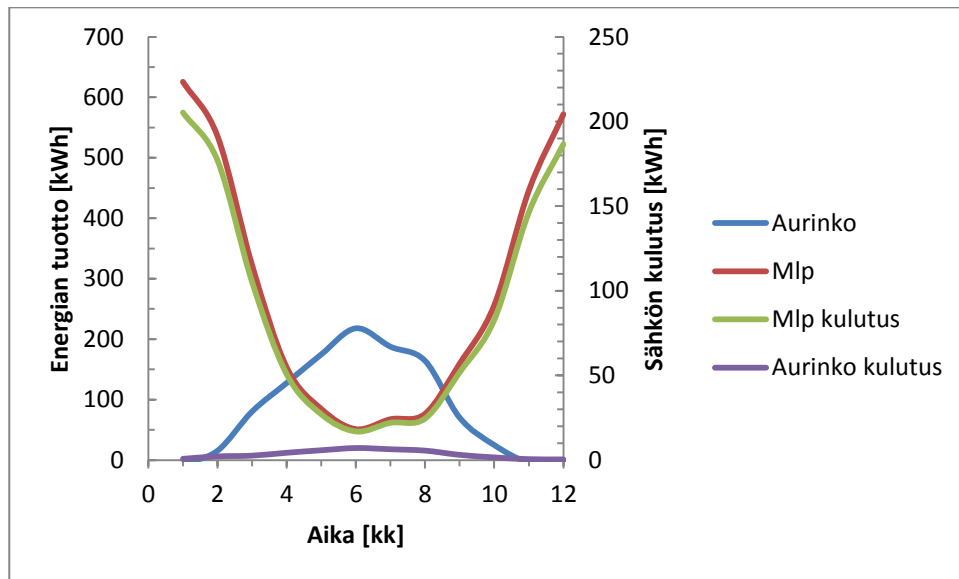
$$SPF_{SHP+} = \frac{Q_{DHW} + Q_{SH}}{P_{el,T}} = \frac{4873,2}{1880,66} = 2,59.$$

Molempien aurinkojärjestelmien SPF-arvot ovat huomattavasti paremmat kuin referenssijärjestelmän. Ilman venttiileitä-järjestelmän SPF-luku on 24,7 prosenttia suurempi ja venttiili-järjestelmän SPF-luku on 20,9 prosenttia suurempi. Tämä johtuu suoraan siitä, että aurinkokeräin pystyy tuottamaan lämpöä vähemmällä sähkönkulutuksella kuin maalämpöpumppu.

6 YHDISTETYN JÄRJESTELMÄN HYÖDYT JA HAITAT

Usean lämmitysmuodon yhdistäminen tuo mukanaan monta asiaa, jotka pitää ottaa huomioon järjestelmää suunniteltaessa ja toteutettaessa. Eri energialähteet toimivat eri lämpötiloissa, joten täytyy päättää mitkä ovat esimerkiksi lämminvesivaraajan lämpötilojen raja-arvot, joilla eri energiamuodot toimivat. Aurinkoenergia toimii korkeammissa lämpötiloissa kuin maalämpö kesällä ja aurinkoisella säällä. Tosin auringon säteilyteho on suurinta silloin kuin lämmitystarve on pienintä eli kesällä. Tällöin tarvitaan vain lämmintä käyttövedettä ja mahdollisesti märkäilöiden mukavuuslattialämmitystä. Aurinkoenergian teho on säästä riippuvainen, mitä maalämpö ei ole. Sähköllä taas saadaan lämminvesivaraaja lämpiämään tasaisesti riippumatta ulkolämpötiloista tai säätiedoista. Sähkö taas kuluttaa eniten energiaa lämmittääkseen lämminvesivaraajaa ja maksaa täten eniten. Tästä johtuen lämminvesivaraajan lämmittämisen olisi hyvä toimia joustavasti, että löydetään kustannustehokkain energiamuoto lämpöenergian tuottamiseen. Tämä vaatii tosin lämmitysjärjestelmän ohjaukselta enemmän, jotta sitä voitaisiin käyttää niin tehokkaasti kuin mahdollista. Jos tiedetään lämpimän käyttöveden tarve, voidaan lämminvesivaraajaa lämmittää ennakoon, ettei lämminvesivaraaja pääse tyhjenemään suuremman kulutuksen aikana. Säätiedotuksella saadaan selville aurinkoenergian mahdollisuus ja voidaan siirtää muiden lämpömuotojen tarvetta myöhemmäksi, koska aurinkoenergia kuluttaa vähän energiaa lämmön tuottamiseen.

Kuvassa 42 on auringon ja maalämmön tuottama lämpöenergia ja sen tuottamiseen käytetty sähköenergian määrä. Maalämmön sähkön kulutus seuraa maalämmön tuottamaa energiaa. Maalämmön energian tuotto on kolminkertainen sen sähkön kulutukseen. Maalämpö tuottaa energiaa tehokkaimmin silloin kuin ulkolämpötila on matalin. Aurinkojärjestelmässä energian tuotto on 26-kertainen verrattuna sen kuluttamaan sähköön. Tämän takia aurinkoenergiaa kannattaa hyödyntää mahdollisimman paljon.



Kuva 42 Yhdistetyn lämmitysjärjestelmän tuottama energia ja sen tuottamiseen käytetty sähkön määrä kuukausittain

Carbonell et al. [12] toteavat tutkimuksessaan, että aurinkokeräinten ja lämpöpumpun yhdistäminen lämmityksen ja kuuman käyttöveden tuottamiseen on hyvin houkutteleva vaihtoehto, kun halutaan lisätä uusiutuvan energian käyttöä maailmanlaajuisesti. Aurinkolämmön yhdistämien lämpöpumppuun lisää järjestelmän monimutkaisuutta ja se voi tuottaa ongelmia. Huono suunnittelu voi tuottaa huonomman suorituskyvyn kuin oli odotettu. Järjestelmän säätöstrategialla ja venttiileillä voi olla suuri merkitys sen toimintaan ja usein ne on todettu syyksi järjestelmän huonoon toimintaan. Järjestelmien leviämisen kannalta on tärkeää, että niistä tehdään suosituksia suunnitteluun sekä tavanomaisiin käyttötilanteisiin.

Useassa kirjallisuuosion artikkelissa ([8], [9], [10], [12]) korostetaan järjestelmien tarkkaa suunnittelua ja mitoitusta. Mitoitus on tärkeää, kun halutaan minimoida energian kulutusta [9]. Tutkimuksissa painotetaan myös järjestelmien ja käytännön säätöjärjestelmien kehittämistä ja standardeiden luomista [8]. Aurinkojärjestelmissä on suurta heilahtelua päivän ja kauden aikana. Tämän takia säätöjärjestelmä on tärkeässä osassa [10]. Järjestelmien suorituskerrointa eli SPF-lukua on hyvä verrata toisiinsa, että saadaan selville toimiiko järjestelmä niin kuin on suunniteltu ([9], [12]).

Maalämpöpumppujärjestelmän säätö tapahtuu lämminvesivaraajan lämpötilojen mukaan. Varaajaa on mahdollista säätää läsnäolon mukaan esimerkiksi pidemmän poissa-

olon aikana. Toiminto säättää lämpötila-asetuksia pienemmäksi, jolloin saadaan säästettyä energiaa. Varaajan toimintaa pystyy myös tehostamaan suuremman kulutuksen aikana. Tällöin varaajassa pidetään käyttöveden lämpötila maksimissa pidemmän aikaa [22].

Trillat-Berdal, Souyri ja Fraisse [23] toteavat tutkimuksessaan, että useamman järjestelmän systeemeissä on helpompaa ohjata järjestelmiä erikseen kuin yhdessä. He kuitenkin toteavat, että ohjauksien täytyy olla toiminnallisesti joustavia vaikka ovat erillisiä. Heidän tutkimuksessaan aurinkokeräimet oli yhdistetty maalämpöjärjestelmään ja keräin kiersi maalämpöpiiriin varaajan täyttyessä. Tutkimuksessa todetaan, että pumppujen ohjauksella on tärkeä rooli lämpöpumpun suorituskertoimen optimoimisessa. Tutkimuksessa oli viisi pumppua käytössä. Jos jokin pumppu toimii jatkuvasti, niin lämpöpumpun COP laski 2,6:een verrattuna systeemin normaaliin arvoon 3,35. Myös pumppujen jatkuva pois-päälle- kytkeytyminen on tärkeää, että maalämpöpumpun vähäinen energian kulutus säilyy. Tähän toimintoon on Mäkisen [4] diplomityön ohjelmakoodi keskittynyt.

Heikkilän työssä [3] aurinko- ja maalämpöjärjestelmät olivat erillisiä ja niitä säädettiin erikseen. Työssäni maalämpöjärjestelmään lisättiin aurinkojärjestelmä. Aurinkokeräinten lisääminen maalämmön avuksi vähentää sähkövastuksen käytön tarvetta. Pelkän keräinten lisääminen vähentää sähkövastusten käyttöä 55,3 prosenttia. Keräinten kiertäessä maalämpöpiiriin yllämmön aikana sähkövastusten käyttö väheni 49,3 prosenttia. Tosin aurinkojärjestelmissä maalämpöpumppu on kaksi prosenttia enemmän päällä kokonaisajasta kuin vertailujärjestelmässä. Tämä korvataan vertailujärjestelmässä sähkövastuksella, joka on päällä kaksi prosenttia enemmän kokonaisajasta. Aurinkojärjestelmät ja vertailujärjestelmä ovat suhteessa yhtä paljon päällä. Vaikka järjestelmät ovat suhteessa saman verran ajasta päällä, aurinkojärjestelmät tuottavat maalämmöllä vähemmän energiaa. Aurinkokeräin tuottaa maalämmön ja vastuksen eron. Aurinkopiirit ovat 12 prosenttia ajasta käytössä.

Uuden järjestelmän lisäys systeemiin tuo vaikeutta suunnitteluun, että löydetään oikeat kytkennät ja raja-arvot. Missä lämpötiloissa kunkin järjestelmän on käynnistytävä ja kuinka pitkään ne ovat päällä. Järjestelmässä on mahdollista, että sähkövastukset ja aurinkoenergia riitelevät keskenään. Pichler et al. [24] esittelevät ja tutkivat työssään hybridimallipohjaista lähestymistapaa ohjata sähkövastuksia hybridivaraajassa. Tarkoituk-

sena on lisätä aurinkoenergian käyttöä ja vähentää sähkövastusten käyttöä sääennusteen avulla. Tutkijat toteavat, että väärä sekä oikea suunnittelu voi aiheuttaa tilanteita, joissa aurinkoenergia kilpailee sähkövastuksen kanssa. Tutkimus osoittaa tavan, jolla tilanne voidaan estää säätiedotuksen avulla.

Wang et al. [6] toteavat myös, että aurinkokeräimellä avustetussa maalämpöpumppujärjestelmässä maan alaisen lämmönvarausyksikön toiminta riippuu suuresti lämminvesivaraajan tilavuudesta ja aurinkokeräinten pinta-alasta. Heidän tutkimuksessa kiinnitetään huomiota siihen, että maalämmön pitkäaikainen käyttö kylmillä alueilla voi johtaa maanpinnan kylmenemiseen, mikä heikentää maalämpöpumpun hyötysuhdetta. Tämän takia he suosittelevat aurinkolämpöä maalämpöpumpun avuksi.

Zhai, X et. al. [25] toteavat tutkimuksessaan, että aurinkokeräimien avulla voidaan tuottaa suoraan lämmintä käyttövettä, korottaa maalämpöpumpun höyrystimen lämpötilaa, ladata maalämpöpumpun porakaivoa tai olla kaikkien näiden yhdistelmä.

7 POHDINTA JA KEHITYSEHDOTUKSET

Aurinkolämpöjärjestelmän pumpun toimintaa voi kehittää. Ohjelmassa pumppu käynnistyy, kun keräimestä ulostulevan nesteen lämpötila on suurempi kuin varaajan alaosan lämpötila. Pumppu olisi hyvä käynnistää ajoittain myös silloin, kun pumppu on pidemmän aikaa pois päältä kuten talvella. Tällöin pumppu ja tiivisteet pysyvät kunnossa eikä vesi-glykoliseos pääse jäätymään talvella putkissa. Seoksen jäätyminen aiheuttaisi keräimen rikkoutumisen. Työssä jäätyminen on jätetty huomioimatta ja oletettu, että seoksen jäätympiste on riittävän alhainen, ettei seos jäädy. Toinen vaihtoehto olisi nopeudeltaan muuttuva pumppu, joka suurentaisi pumpun kiertonopeutta säteilyn määrän kasvaessa. Tällöin pumppu olisi yhtäjaksoisesti päällä pienellä teholla ja virtaus nopeutuisi säteilyn kasvaessa. Tämä lisää pumpun käyntiaikaa ja kuluttaa siten enemmän energiaa.

Aurinkolämmön tehostaminen olisi tärkeää kannattavuuden kannalta. Aurinkolämmön hyötysuhteen parantaminen vähentäisi maalämmön tarvetta. Ohjelmakoodille voisi antaa auringon säteilytiedot ennusteena. Kun ohjelmakoodi saisi etukäteen tiedon säteilyn voimakkuudesta, se voisi siirtää maalämpöpumpun käynnistämistä. Tällä tavalla aurinkoenergia saadaan priorisoitua. Käytännössä tämä tarkoittaisi, että auringon säteilylle annettaisiin päivällä esimerkiksi klo 8-16 välisenä aikana mahdollisuus lämmittää varaaja ennen kuin maalämpöpumppu menisi päälle. Ohjelmakoodissa olisi ajastin, joka käynnistäisi aurinkolämmön, jos säteily on riittävä. Kun kellonaika on umpeutunut ja varaaja ei ole lämmennyt tarpeeksi, menisi maalämpöpumppu päälle. Ohjelmakoodille olisi annettu kuitenkin minimilämpötila, jonka alle varaajan lämpötila ei saa laskea. Lämpötilan laskiessa tämän alle varaaja käynnistyisi vaikka ajastin olisi vielä toiminnassa. Käytännön tilanteissa keräimen lämpötilan täytyy olla kuusi astetta korkeampi kuin varaajan alaosan lämpötilan. Ohjelmakoodissa keräimen täytyy olla vain lämpimämpi kuin varaajan alaosan. Keräin sammuu, kun lämpötilaero on neljä astetta. Samoin käyttöveden lämpötila voi olla lähempänä 45 °C astetta kuin 55 °C astetta kuten simuloinnissa on asetettu. [26].

Säätölaitteiden ja – järjestelmien kehittyminen on tärkeää, että aurinkoenergia saadaan priorisoitua. Auringolla tuotettu lämpö on edullisempaa kuin maalämmöllä tai sähköllä tuotettu. Nykyisissä säätölaitteissa ei ole internet-yhteyttä, että laitteet voisivat saada

reaaliaikaiset säätiedot. Sääennusteen mukaan voitaisiin päättää, mitä lämmitysjärjestelmää käytettäisiin, että lämmitysenergia saataisiin tuotettua mahdollisimman tehokkaasti.

Aurinkolämmön siirtäminen maalämmön keruupiiriin ei ole kannattavaa, koska maanpinta ehtii jäähtyä ennen kuin lämpöä käytetään. Kun käytetään vaakasuuntaisia keräysputkia porakaivon sijasta, maanpinnan lämpeneminen voi olla tehokkaampaa.

Lämpimän käyttöveden kulutuksen vaikutusta ei ole huomioitu ohjelmakoodissa ja tästä johtuu lämpimän käyttöveden loppuminen. Ohjelmakoodiin pitäisi lisätä käyttöveden kulutus, että lämminvesivaraaja pystyttäisiin varaamaan täyteen ennen kulutuspiikkiä. Näin lämmin käyttövesi ei pääsisi loppumaan kesken saunomisen. Lämmin käyttövesi pitäisi lämmittää kuumemmaksi, ettei lämpötila pääsisi laskemaan liian paljon huippukulutuksen aikana. Lämmin käyttövesi käyttää kuitenkin 15 – 25 prosenttia lämmitysenergiasta. Energiatehokkaiden rakennusten myötä käyttöveden lämmitysenergian osuus kasvaa, joten siitä tulee merkittävä tekijä lämmitysenergian kulutuksessa.

Simuloinnissa on huomioitu vain yksi tila, joka hieman vääristää ajatusta rakennuksen lämmityksestä. Tämän huomaa varsinkin, kun selvitetään järjestelmän päällä oloaikoja. Jos simulointi tehtäisiin koko rakennuksen lämmitykseen, olisi tilanne aivan toinen. Tällöin lämmitysjärjestelmät olivat enemmän päällä ja aurinkolämmön sekä maalämmön osuus kasvaisivat entisestään. Rakennuksessa on käytössä vesikiertoinen lattialämmitys. Käytännössä märkätiloissa on kesälläkin lattialämmitys toiminnassa, mitä ei ole huomioitu simuloinnissa. Tämän osuus on kuitenkin pieni verrattuna koko rakennuksen lämmittämiseen.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityön tavoitteena oli demonstroida pientalon lämmitysjärjestelmän toimintaa, joka rakentuu useasta energialähteestä. Työssä tutkittiin sähkön, maalämmön ja aurinkolämmön yhdistämistä lämmitysjärjestelmän energiantuottajana. Usean energijärjestelmän koordinoitu ohjaus pientalossa on energiatehokkaampi ratkaisu kuin kunkin järjestelmän ohjaus erikseen, mutta tuo lisähaasteita suunnitteluun.

Tällä hetkellä aurinkojärjestelmän investointikustannukset ovat liian suuret verrattuna tavalliseen maalämpöpumppujärjestelmään, että lisäinvestointi olisi kannattava. Aurinkojärjestelmän hyötysuhteen parantuessa, aurinkokeräinten ja hybridivaraajien halventuessa voi yhdistetty järjestelmä tulla kannattavaksi.

Usean energiamuodon yhdistäminen yhdeksi lämmitysjärjestelmäksi tuo järjestelmän suunnitteluun ja toteuttamiseen haasteita sopivien kytkentöjen, toimintalämpötilojen ja toiminta-aikojen kannalta, koska energiamuodot toimivat parhaiten eri lämpötiloilla ja eri olosuhteissa. Yhdistetyn järjestelmän ohjaus olisi saatava joustavaksi, että järjestelmä saataisiin toiminaan kustannustehokkaaksi ja etteivät eri lämmitysmuodot sulje toisiaan pois. Lämmitysjärjestelmän ohjauksen tietäessä etukäteen säätiedot ja kulutustiedot, pystyttäisiin toimintalämpötiloja muuttamaan tilanteen mukaan ja aloittamaan vesi-varaajan lataaminen etukäteen kustannustehokkaimmalla energiamuodolla, mikä vähentäisi sähkön kulutusta. Aurinkolämmön tuottaminen on erittäin kustannustehokasta ja siksi tämän priorisointi verrattuna muihin energiamuotoihin on tärkeää.

LÄHDELUETTELO

- [1] Ympäristöministeriö, ”Ympäristöministeriö,” [Online]. Available: www.ymparisto.fi. [Haettu 10 Joulukuu 2012].
- [2] B. Erat, V. Erkkilä, C. Nyman, K. Peippo, S. Peltola ja S. Hannu, Aurinko-opas aurinkoenergiaa rakennuksiin, Helsinki: Aurinkoteknillinen yhdistys ry, 2008.
- [3] M. Heikkilä, Simulointimalli maa- ja aurinkolämpöön perustuvalle lattialämmitysjärjestelmälle, Espoo: Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos, 2012.
- [4] J. Mäkinen, ”Rakennuksen sähkökustannusten pienentäminen maalämpöjärjestelmän kvalitatiivisen ohjauksen avulla,” Espoo: Aalto-yliopisto, Energiatekniikan laitos, 2013.
- [5] F. M. Rad, A. S. Fung ja W. H. Leong, ”Combined solar thermal and ground source heat pump,” tekijä: *Building Simulation 2009. 11. International IBPSA Conference. s.2297-2305*, 2009.
- [6] E. Wang, A. S. Fung ja W. H. Leong, ”Performance prediction of a hybrid solar ground-source heat pump system,” *Energy and Buildings*, nro 47, pp. 600-601, 2012.
- [7] T. Hu, J. Zhu ja W. Zhang, ”Experimental Investigation on System with Combination of Groun-Source Heat Pump and Solar Collector,” *Transactions of Tianjin University. 2013 Vol 19 No 3 s.157-167*, 2013.
- [8] C. Xi, L. Lin ja Y. Hongxing, ”Long term operation of solar assisted ground coupled heat pump system for space heating and domestic hot water,” *Energy and Buildings*, nro 43, pp. 1835-1844, 2011.
- [9] E. H. G. Kjellsson ja B. Perers, ”Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings,” *Energy*, nro 35, pp.

2667-2673, 2010.

- [10] M. W. Ahmad, M. Eftekhari, T. Steffen ja A. M. Danjuma, "Investigating the performance of a combined solar system with heat pump for houses," *Energy and Buildings*, nro 63, pp. 138-146, 2013.
- [11] X. Wang, M. Zheng, S. Zhang ja T. Yang, "Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas," *Energy and Buildings*, nro 42, pp. 2104-2110, 2010.
- [12] D. Carbonell, H. M. Y., D. Philippen ja F. Elimar, "Simulations of combined solar thermal and heat pump systems for domestic hot water and space heating," *Energy Procedia*, nro 48, pp. 524-534, 2014.
- [13] Akvaterm, "AkvaGeo-lämminvesivaraaja," [Online]. Available: http://www.akvaterm.fi/fin/Lamminvesivaraajat/AKVA_GEO.203.html. [Haettu 17 7 2013].
- [14] Jäspi, "Jäspi Hybridivaraaja. Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje," http://www.kaukora.fi/sites/default/files/kaukorafiles/kayttoohjeet/Hybridivaraaja_500-160ja700-200_ver26.10.10.pdf, lainattu 19.11.2013.
- [15] J. Asikainen, "Hybridivaraajan mitoitus," Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu., 2012.
- [16] Oilon, "Oilon-hybridivaraaja," <http://oilon.com/oilon-home/tuotteet/hybridiratkaisut/>, lainattu 19.11.2013.
- [17] Nereus, [Online]. Available: http://www.nereus.fi/aurinkolampo/aurinkoenergia_yhdessa_lampopumpun_kanssa. [Haettu 30 08 2013].
- [18] Akvaterm, "Muut tuotteet: Käyttövesikierukat," [Online]. Available: <http://www.akvaterm.fi/fin/Lammonvaihtimet/Kayttovesikierukat.213.html>. [Haettu 28 8 2014].

- [19] Jodat Ympäristöenergia Oy, ”Tuotteet: Levylämminvaihdin & kierukka,” [Online]. Available: http://energiakauppa.com/shop/category_levyl%25C3%25A4mm%25C3%25B6nvaihdin%2520%2526%2520kierukka/levyl%C3%A4mm%25C3%B6nvaihdin--kierukka.html?sessid=vRc4mrDdeSPgtzqMqFou1JB5Bpb2yPKFzPtVr5WLx5oE31pFT98Ah8Ea3qLrX0cQ&shop_param=cid%3D%26. [Haettu 28 3 2014].
- [20] Ympäristöministeriö, ”D3 Rakennusten energiatehokkuus,” Rakennetun ympäristön osasto, Helsinki, 2011.
- [21] ”Sähkön hinta,” Energiamarkkinavirasto, 20 03 2013. [Online]. Available: www.sahkonhinta.fi.
- [22] Lämpöässä, ”Ässäcontrol-käyttöohje. Lämpöässä T40-120 malleille,” Lämpöässä, 2013.
- [23] V. Trilland-Berdal, B. Souyr ja G. Fraisse, ”Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors,” *Energy and Buildings*, nro 38, pp. 1477-1484, 2006.
- [24] M. F. Pichler, W. Lerch, A. Heinz, G. Goertler, H. Schranzhofer ja R. Rieberer, ”A novel linear predictive control for auxiliary energy,” *Solar Energy*, nro 101, pp. 203-219, 2014.
- [25] T. Jodat, Interviewee, *Jodat Ympäristöenergia Oy*. [Haastattelu]. 26 6 2014.
- [26] X. Zhai, M. Qu, X. Yu, Y. Yang ja R. Wang, ”A review for the applications and integrated approaches of ground-coupled heat pump systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, osa/vuosik. 15, nro 6, pp. 3133-3140, 2011.

Liite A. Type264 Fortran-koodi venttiili-järjestelmälle

```
IF (Time < 0) THEN
OPEN (7,FILE='ohjausdata')
END IF

IF (tmp .NE. Time) THEN
tmp = Time

IF (Time == Kierros .AND. TcollOut <= Tnode8) THEN !1
Kierros = Time + 6
aputime = Time
apuTnode4 = Tnode4
lopetus = 0
lopetus_1 = 1
Ctrl_SC = 0
Ctrl_HP = 0
Ctrl_solarValve = 0
Ctrl_hpPump = 0
aika = Time+6
Call taulukoita(apuTime, apuTnode4, TcollOut,arvo)
Start = Time + arvo
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !1

IF (Time == Kierros .AND. TcollOut > Tnode8) THEN !2
Kierros = Time + 6
aputime = Time
apuTnode4 = Tnode4
lopetus = 0
lopetus_1 = 2
Ctrl_SC = 1
Ctrl_HP = 0
Ctrl_solarValve = 0
Ctrl_hpPump = 0
aika = Time+6
Call taulukoita(apuTime, apuTnode4, TcollOut,arvo)
Start = Time + arvo
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !2

IF (Troom <= 21.00 .AND. Tnode4 <= 54.00 .AND. TcollOut <= Tnode8 &
.AND. lopetus == 0 .AND. Time < Kierros) THEN !3
apuTime = Time
Ctrl_SC = 0
Ctrl_HP = 0
Ctrl_solarValve = 0
Ctrl_hpPump = 0
lopetus = 5
lopetus_1 = 3
aika = int(Time)
Call ali_huone(apuTime,arvo)
Start = Time + arvo
```

```

WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !3

IF (Troom <= 21.00 .AND. Tnode4 <= 54.00 .AND. TcollOut > Tnode8 &
.AND. lopetus == 0 .AND. Time < Kierros) THEN !4
    apuTime = Time
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_HP = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 5
    lopetus_1 = 4
    aika = int(Time)
Call ali_huone(apuTime,arvo)
    Start = Time + arvo
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !4

IF (Time < Start .AND. lopetus == 5 .AND. TcollOut <= Tnode8 .AND. &
Time < Kierros) THEN !5
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_HP = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 5
    lopetus_1 = 6
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !5

IF (Time < Start .AND. Troom > 21.00 .AND. lopetus == 0 .AND. &
TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95 .AND. Time < Kierros) THEN !7
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_HP = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 5
    lopetus_1 = 7
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !7

IF (Time < Start .AND. Troom > 21.00 .AND. lopetus == 0 .AND. &
TcollOut <= Tnode8 .AND. Time < Kierros) THEN !8
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_HP = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 5
    lopetus_1 = 8
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &

```

```
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1  
END IF !8
```

```
IF (Time >= Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 >= 95.00 .AND.&  
lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !9  
    Ctrl_SC = 1  
    Ctrl_Hp = 0  
    Ctrl_solarValve = 1  
    Ctrl_hpPump = 1  
    lopetus = 6  
    lopetus_1 = 11  
    aika = int(Time)  
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &  
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1  
END IF !9
```

```
IF (Time > Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 >= 95.00 .AND.&  
lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !10  
    Ctrl_SC = 1  
    Ctrl_Hp = 0  
    Ctrl_solarValve = 1  
    Ctrl_hpPump = 1  
    lopetus = 6  
    lopetus_1 = 12  
    aika = int(Time)  
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &  
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1  
END IF !10
```

```
IF (Time >= Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND.&  
Tnode4 < 55 .AND. lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !11  
    Ctrl_SC = 1  
    Ctrl_Hp = 1  
    Ctrl_solarValve = 0  
    Ctrl_hpPump = 1  
    lopetus = 6  
    lopetus_1 = 13  
    aika = int(Time)  
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &  
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1  
END IF !11
```

```
IF (Time > Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND.&  
Tnode4 < 55 .AND. lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !12  
    Ctrl_SC = 1  
    Ctrl_Hp = 1  
    Ctrl_solarValve = 0  
    Ctrl_hpPump = 1  
    lopetus = 6  
    lopetus_1 = 14  
    aika = int(Time)  
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &  
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1  
END IF !12
```

```

IF (Time >= Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND.&
Tnode4 >= 55 .AND. lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !13
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 5
    lopetus_1 = 15
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !13

```

```

IF (Time > Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND.&
Tnode4 >= 55 .AND. lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !14
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 16
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !14

```

```

IF (Time < Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. TcollOut > 95 .AND.&
Tnode4 >= 55 .AND. lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !15
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 1
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 5
    lopetus_1 = 30
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !15

```

```

IF (Time < Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. TcollOut > 95 .AND.&
Tnode4 >= 65 .AND. lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !16
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 1
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 31
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !16

```

```

IF (Time < Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. TcollOut > 95 .AND.&
Tnode4 >= 65 .AND. lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !17
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0

```

```

        Ctrl_solarValve = 1
        Ctrl_hpPump = 1
        lopetus = 6
        lopetus_1 = 32
        aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !17

IF (Time >= Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 < 55.00 .AND.&
lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !18
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 1
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 17
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !18

IF (Time > Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 < 55.00 .AND.&
lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !19
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 1
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 18
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !19

IF (Time >= Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 >= 55 .AND.&
lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !20
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 19
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !20

IF (Time > Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 >= 55 .AND.&
lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !21
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 7
    lopetus_1 = 20

```



```

        aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !21

IF (Time > Start .AND. Time < Kierros .AND. TcollOut <= Tnode8 .AND.&
lopetus == 7 ) THEN !22
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 7
    lopetus_1 = 21
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !22

IF (Time > Start .AND. Time < Kierros .AND. TcollOut > Tnode8 .AND.&
lopetus == 7 ) THEN !23
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 7
    lopetus_1 = 22
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !23

END IF

359    Format (10(f10.2,1X))

Call SetOutputValue(1, Ctrl_SC)
Call SetOutputValue(2, Ctrl_HP)
Call SetOutputValue(3, Ctrl_solarValve)
Call SetOutputValue(4, Ctrl_hpPump)
Call SetOutputValue(5, lopetus_1)

Return
End SUBROUTINE Type264

```

Liite B. Type264 Fortran-koodi ilman venttiileitä-järjestelmälle

```
IF (Time < 0) THEN
OPEN (7,FILE='ohjausdata')
END IF

IF (tmp .NE. Time) THEN
    tmp = Time

IF (Time == Kierros .AND. TcollOut <= Tnode8) THEN !1
    Kierros = Time + 6
    aputime = Time
    apuTnode4 = Tnode4
    lopetus = 0
    lopetus_1 = 1
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_HP = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    aika = Time+6
    Call taulukoita(apuTime, apuTnode4, TcollOut,arvo)
    Start = Time + arvo
    WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
    Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
    END IF !1

IF (Time == Kierros .AND. TcollOut > Tnode8) THEN !2
    Kierros = Time + 6
    aputime = Time
    apuTnode4 = Tnode4
    lopetus = 0
    lopetus_1 = 2
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_HP = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    aika = Time+6
    Call taulukoita(apuTime, apuTnode4, TcollOut,arvo)
    Start = Time + arvo
    WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
    Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
    END IF !2

IF (Troom <= 21.00 .AND. Tnode4 <= 54.00 .AND. TcollOut <= Tnode8 &
    .AND. lopetus == 0 .AND. Time < Kierros) THEN !3
    apuTime = Time
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_HP = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 5
```

```

        lopetus_1 = 3
        aika = int(Time)
    Call ali_huone(apuTime,arvo)
        Start = Time + arvo
    Write (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
    Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
    End If !3

    If (Troom <= 21.00 .AND. Tnode4 <= 54.00 .AND. TcollOut > Tnode8 &
    .AND. lopetus == 0 .AND. Time < Kierros) Then !4
        apuTime = Time
        Ctrl_SC = 1
        Ctrl_HP = 0
        Ctrl_solarValve = 0
        Ctrl_hpPump = 0
        lopetus = 5
        lopetus_1 = 4
        aika = int(Time)
    Call ali_huone(apuTime,arvo)
        Start = Time + arvo
    Write (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
    Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
    End If !4

    If (Time < Start .AND. lopetus == 5 .AND. TcollOut <= Tnode8 .AND. &
    Time < Kierros) Then !5
        Ctrl_SC = 0
        Ctrl_HP = 0
        Ctrl_solarValve = 0
        Ctrl_hpPump = 0
        lopetus = 5
        lopetus_1 = 6
        aika = int(Time)
    Write (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
    Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
    End If !5

    If (Time < Start .AND. Troom > 21.00 .AND. lopetus == 0 .AND. &
    TcollOut>Tnode8 .AND. Tnode1 < 95 .AND. Time < Kierros) Then !6
        Ctrl_SC = 1
        Ctrl_HP = 0
        Ctrl_solarValve = 0
        Ctrl_hpPump = 0
        lopetus = 5
        lopetus_1 = 7
        aika = int(Time)
    Write (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
    Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
    End If !6

    If (Time < Start .AND. Troom > 21.00 .AND. lopetus == 0 .AND. &
    TcollOut <= Tnode8 .AND. Time < Kierros) Then !7
        Ctrl_SC = 0
        Ctrl_HP = 0
        Ctrl_solarValve = 0
        Ctrl_hpPump = 0

```

```

        lopetus = 5
        lopetus_1 = 8
        aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !7

IF (Time >= Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 >= 95.00 .AND.&
lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !8
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 11
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !8

IF (Time > Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 >= 95.00 .AND.&
lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !9
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 12
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !9

IF (Time >= Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND. &
Tnode4 < 55 .AND. lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !10
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 1
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 13
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !10

IF (Time > Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND. &
Tnode4 < 55 .AND. lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !11
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 1
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 14
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &

```

```
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !11
```

```
IF (Time >= Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND. &
Tnode4 >= 55 .AND. lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !12
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 5
    lopetus_1 = 15
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !12
```

```
IF (Time > Start .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. Tnode1 < 95.00 .AND. &
Tnode4 >= 55 .AND. lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !13
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 16
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !13
```

```
IF (Time >= Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 < 54.00 .AND. &
lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !14
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 1
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 17
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !14
```

```
IF (Time > Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 < 55.00 .AND. &
lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !15
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 1
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 1
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 18
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !15
```

```

IF (Time >= Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 >= 56 .AND. &
lopetus == 5 .AND. Time < Kierros) THEN !16
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 6
    lopetus_1 = 19
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !16

IF (Time > Start .AND. TcollOut < Tnode8 .AND. Tnode4 >= 56 .AND. &
lopetus == 6 .AND. Time < Kierros) THEN !17
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 7
    lopetus_1 = 20
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !17

IF (Time > Start .AND. Time < Kierros .AND. TcollOut <= Tnode8 .AND. &
lopetus == 7 ) THEN !18
    Ctrl_SC = 0
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 7
    lopetus_1 = 21
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !19

IF (Time > Start .AND. Time < Kierros .AND. TcollOut > Tnode8 .AND. &
lopetus == 7 ) THEN !20
    Ctrl_SC = 1
    Ctrl_Hp = 0
    Ctrl_solarValve = 0
    Ctrl_hpPump = 0
    lopetus = 7
    lopetus_1 = 22
    aika = int(Time)
WRITE (7,359) Time, Troom, Tnode4, Tnode8, TcollOut, Ctrl_SC, &
Ctrl_HP, Ctrl_solarValve, Ctrl_hpPump, lopetus_1
END IF !20

END IF

359      Format (10(f10.2,1X))

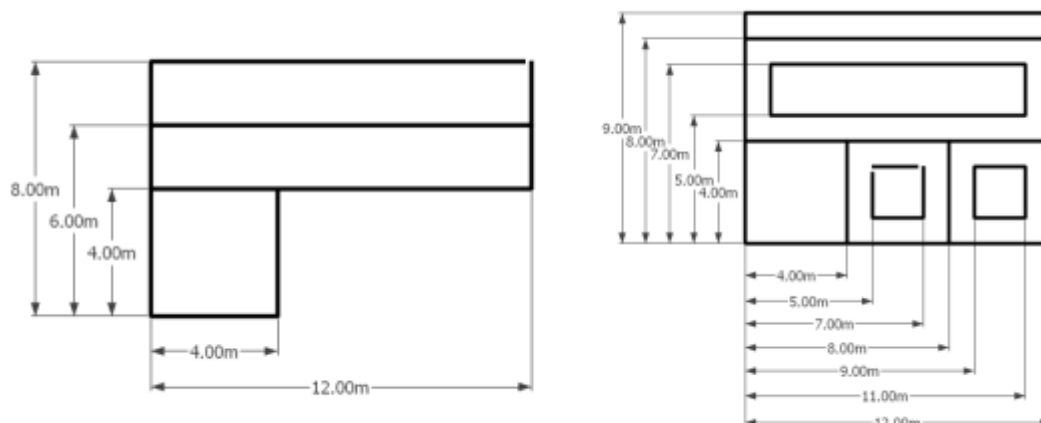
```

```
Call SetOutputValue(1, Ctrl_SC)
Call SetOutputValue(2, Ctrl_HP)
Call SetOutputValue(3, Ctrl_solarValve)
Call SetOutputValue(4, Ctrl_hpPump)
Call SetOutputValue(5, lopetus_1)
```

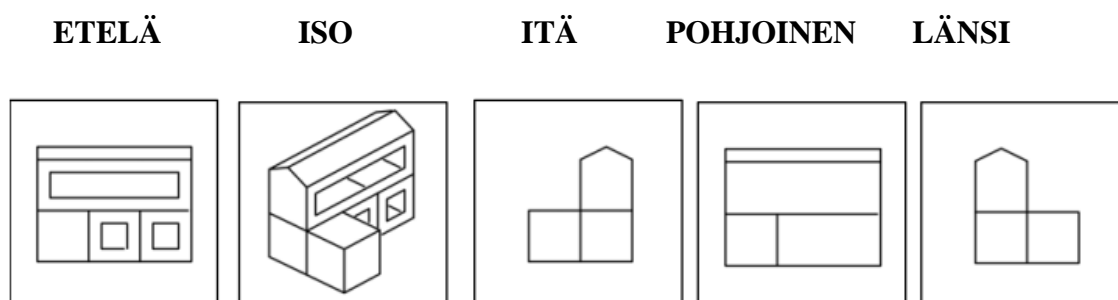
```
Return
```

```
End SUBROUTINE Type264
```

Liite C. Rakennusmalli



Kuva A.1 Rakennuksen mitat

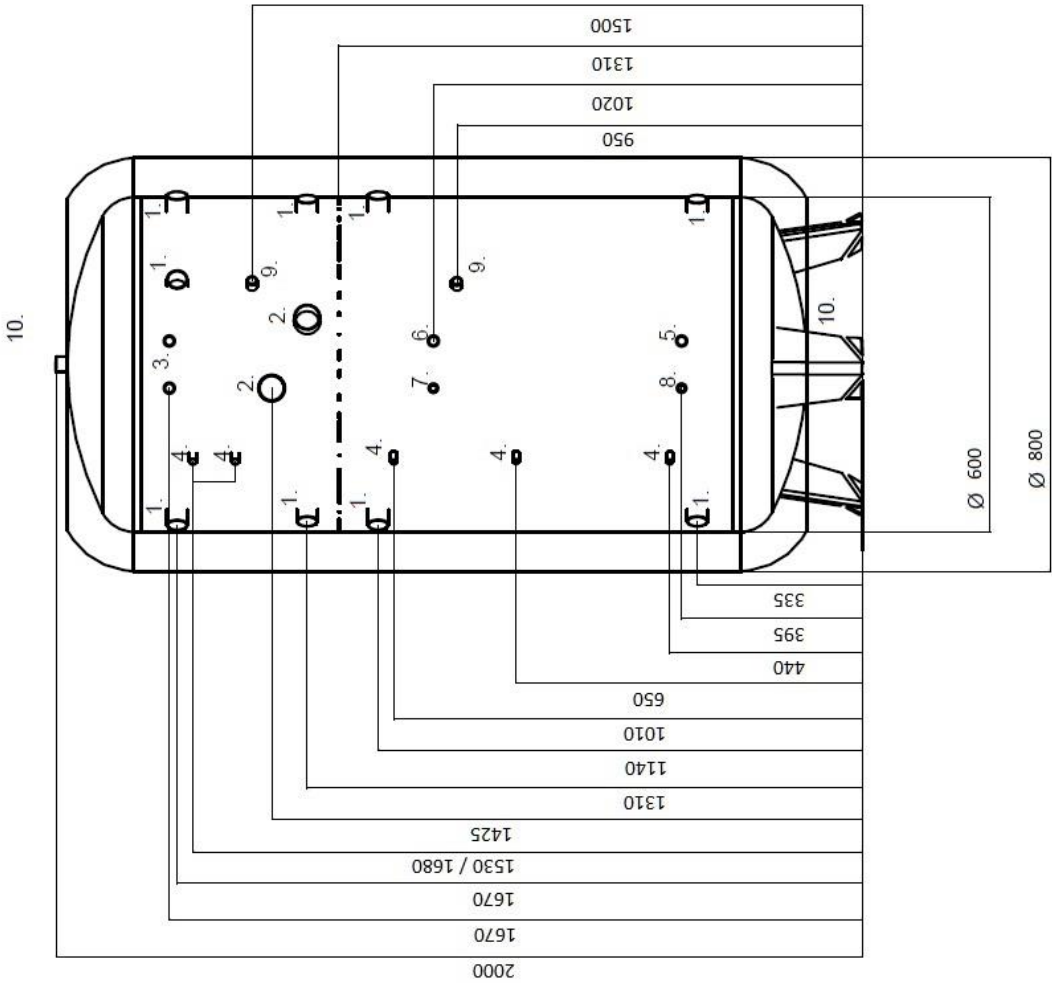


Kuva A.2 Rakennus kuvattuna eri ilmansuunnista

Liite D. Hybridvaraajan tiedot

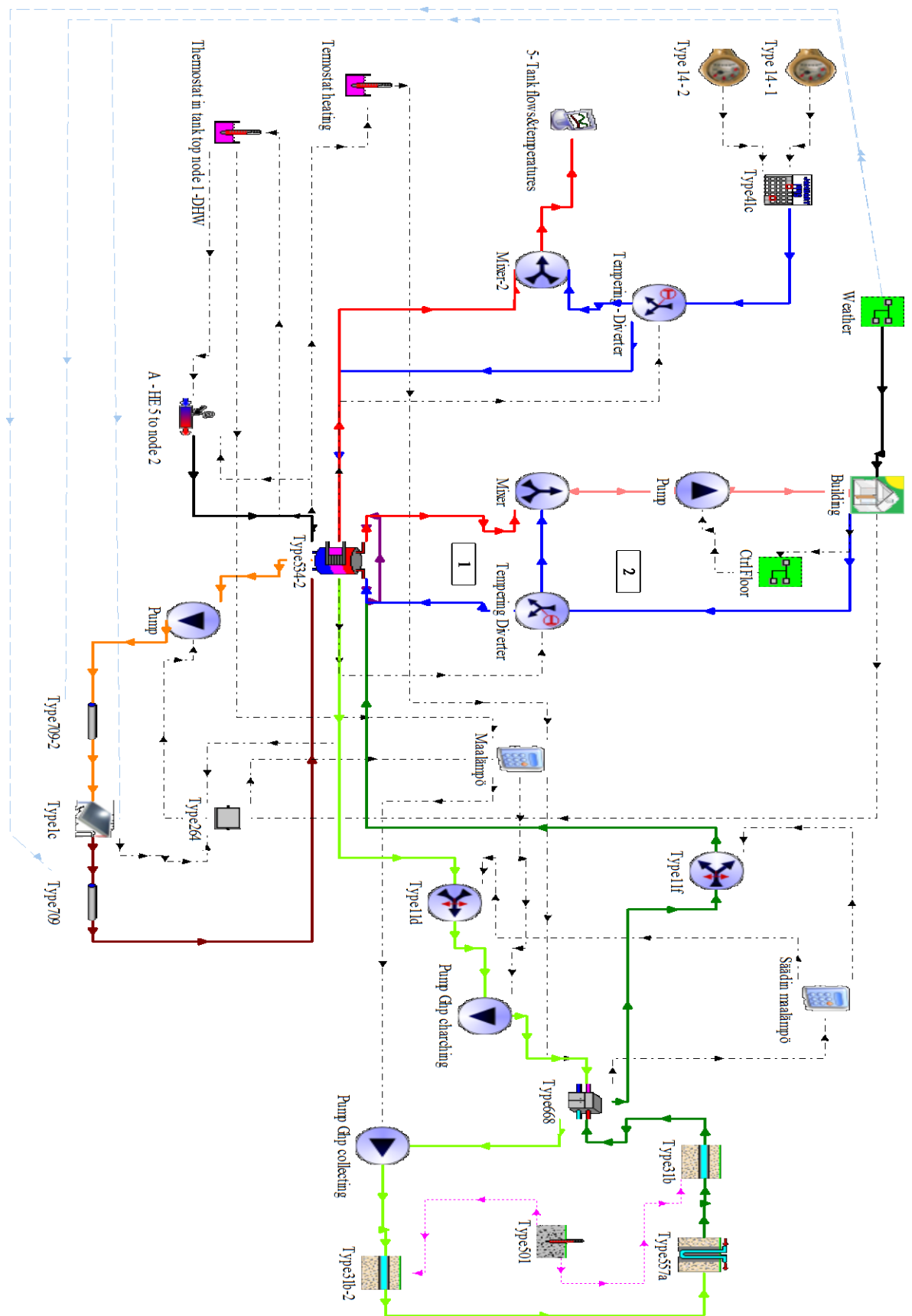
nro.	Tarkoitus	koko
1.	Lataus- / verkostoyhde	DN32
2.	Vastusyhde	DN50
3.	Käyttövesi	22mm
4.	Anurilasku	11mm(s)
5.	Käyttöveden esilämmitys sisään	22mm
6.	Käyttöveden esilämmitys Ulos	22mm
7.	Aurinkolämpö sisään	18mm
8.	Aurinkolämpö ulos	18mm
9.	Lämpömittariyhde	DN20
10.	Ilmaus- ja tyhjennysyhteet	DN25

Mitat suuntaa antavia



AWB 500

Liite F. Aurinko-maalämpöjärjestelmä



Liite G. Aurinkopiirin kierto maalämmön keruupiirin venttiileiden kautta

